الطبعة الثانية

قصة

الكون

جون جريبين

ترجمة

د. مصطفى إبراهيم فهمي

قصة الكون

قصة الكون

تأليف

جون جريبين

ترجمة

د. مصطفى إبراهيم فهمي

مكتبة | 268



قصة الكون

جون جريبين

The Universe: A Biography

John Gribbin

الطبعة الثانية ١٤٣٢هـ-٢٠١١م
رقم إيداع ١٦٠٤٦/ ٢٠١٠

كلمات عربية للترجمة والنشر
إن كلمات عربية للترجمة والنشر غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
مكتب رقم ٤، عقار رقم ٢١٩٠، زهراء مدينة نصر، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٢٧٤٣١ ٢٠٢+ **فاكس:** ٢٢٧٠٦٣٥١ ٢٠٢+
البريد الإليكتروني: kalimat@kalimat.org
الموقع الإليكتروني: http://www.kalimat.org

جريبين، جون
قصة الكون / جون جريبين؛ ترجمة مصطفى إبراهيم فهمي . - القاهرة : كلمات عربية للترجمة والنشر، ٢٠١٠.
٢٩٦ص، ١٤,٥×٢١,٠سم
تدمك: ٤ ٦٠ ٦٢٦٣ ٩٧٧ ٩٧٨
١- الكون
أ- فهمي، مصطفى إبراهيم (مترجم)
ب- العنوان
٥٢٣,١

المحتويات

أقرأناكموه

قصة الكون

يعد جون جريبين أحد أعظم الكتاب المعاصرين في مجال العلوم المبسطة، ومؤلف العديد من الكتب الأكثر مبيعًا، من بينها البحث عن قطة شرودينجر،[1] وغبار النجوم،[2] وتاريخ العلم،[3] والبساطة العميقة،[4] والجماعة.[5] ويشتهر جون بين جمهوره العريض بقدرته على تبسيط الأفكار المعقدة، ويقول إن الهدف الذي ينشده من وراء كتاباته — التي ينجز أغلبها بمساعدة زوجته ماري جريبين — هو أن ينقل لقرائه إحساسه بالانبهار من غرابة الكون. درس جون الفيزياء الفلكية في جامعة كيمبريدج، ويحتل حاليًّا منصب زميل زائر لقسم علم الفلك بجامعة ساسكس. يستمتع جون في وقت فراغه بتأليف قصص الخيال العلمي، ويؤلف أغلب كتبه في غرفة بحديقة منزله الخلفية.

---

[1] In Search of Schrödinger's Cat.

[2] Stardust.

[3] Science: A History.

[4] Deep Simplicity.

[5] The Fellowship.

من أجل بين وإيلي

ليس ما يميز رجل العلم هو «ما الذي» يؤمن به، وإنما «كيف» و«لماذا» يؤمن به. إن معتقدات رجل العلم ليست نهائية ولا دوجماتية، إنها معتقدات تعتمد على الأدلة، وليس على الخبرة أو الحدس.

بيرتراند راسل
(١٨٧٢–١٩٧٠)

شكر

معظم الأبحاث في كتبي الحديثة قد تطلبت التنقيب في ملفات أرشيف متربة وقراءة تقارير غير مباشرة (في أحسن وصف) حول حياة وأبحاث أفراد قد ماتوا. إلا أنني في عملي هذا الكتاب تحدثت إلى أفراد أحياء حول أبحاثهم الخاصة، وإذا كان في هذا ما يثير حيرة وحرجًا إلا أن فيه نوعًا من تغيير ممتع. على أن هدفي هنا هو أن أعطي نظرة شاملة عما يدور حاليًا في العلوم الفيزيائية، ولهذا السبب فإني نادرًا ما أشرت بالاسم إلى الأفراد أو إلى أجزاء مفردة من البحث، في النص الرئيسي. إذا كنت قد تعلمت شيئًا واحدًا من كتاباتي لكتبي التي تتجه أكثر إلى المنحى التاريخي، فهو أن العلم نشاط جماعي. كلمة «نحن» التي تظهر في النص تشير إلى كل مجموعة العلماء، في الماضي والحاضر، ممن أسهموا في فهمنا للكون الفيزيائي ولكني ما كنت أستطيع تأليف هذا الكتاب لولا ما أجريته من مناقشات ومراسلات مع الكثيرين من أفراد الباحثين، سواء أكان ذلك بوجه خاص من أجل هذا الكتاب أم لمناسبات أخرى عبر السنين، وأنا هكذا أود أن أقدم الشكر لكل من كيفورك أبازاجيان، وجون باكال، وجون بارو، وفرنك كلوز، وإد كوبلاند، وبيير-ستيفانو كراسنتي، وجون فولكنر، وإجناسيوفيريراس، وسيمون جودوين، وآن جرين، وبن جريبين، وآلان جوث، ومارتن هندري، ومارك هندمارش، وجلبرت هولدر، وإيزوبل هوك، وجيم هاف، وستيف كنج، وكريس لادرو، وأوفر لاهاف، وأندرو ليدل، وأندريه لند، وجيم لوفلوك، وجابرييلا دي لوسيا، ومايك ماك أنتير، وإيليا مسكو، وجايانت نارليكار، ومارتن ريز، وليزيك روزكوسكي، وبي ساثيا

براكاش، وريتشارد سافيج، وبيتر شرودر، وبروس سلجاك، ولي سمولين، وآدم ستانفورد، وبول شتاينهاردت، وكريستين ستون، وبيتر توماس، وكيب ثورن، وإد تريون، ونيل توروك، وأيان وادينجتون، وذلك لما بذلوه كلهم من استجابة كريمة لإشراكي في أفكارهم. بالعودة وراء لما هو أبعد، أجد أن عليَّ دين لا يمكن أن أفي به للعديد من العلماء الذين لم يعودوا بعد معنا؛ وهم حسب ترتيب ما بذلوا من فيض جهدهم لي، بيل ماك كريا، وفريد هويل، وويلي فولر، وروجر تيلر، وجون ماينارد-سميث.

أود أن أشكر أيضًا كريستين ودافيد جلاسون، وهما المسئولان عن جعلي أنال فترات راحة من العمل من حين لآخر؛ وكذلك أقدم شكري لمؤسسة ألفريد سي مونجر، التي منحتني إسهامًا كريمًا في رحلات سفري ونفقات البحث الأخرى، كما أقدم الشكر لجامعة ساسكس التي وفرت لي مقر قاعدة لعملي.

إلا أنه كما هي العادة، فإن أعظم إسهام أتى من وراء الكواليس من شريكتي الموجودة معي أبدًا وإن كانت غير مرئية على الدوام، ماري جريبين.

تمهيد

قصة الكون

عندما شرعت في تأليف كتب حول العلوم منذ أكثر من ثلاثين عامًا، ظننت في البداية أنني أتعامل مع حقائق قاطعة، مثل قوانين نيوتن، وحركة القارات على سطح الأرض، وإطلاق النجوم الطاقة من خلال عملية الاندماج النووي التي تحدث في أعماقها، وما إلى ذلك. وبمرور الوقت عندما بدأت أهتم أكثر فأكثر بتاريخ العلم والسير، حيرتني حقيقة أن هذه البحوث غير موضوعية وقابلة للتأويل إلى حد ما. يستحيل أن نكتب تاريخ العلم (أو تاريخ أي شيء آخر) لأننا لا نملك كل الحقائق، وعلينا أن نملأ الفجوات بالاستدلال، وإن كان استدلالًا قائمًا على المعرفة يعتمد على كل الحقائق التي لدينا. وبالمثل أيضًا يستحيل كتابة سيرة إنسان (حتى لو كان لا يزال على قيد الحياة) لأن ذاكرة الإنسان غير معصومة من الخطأ والسجلات غير كاملة. وأدركت أخيرًا أن نفس الحدود تسري على أي محاولة لكتابة تاريخ الكون أو قصته. فعلى الرغم من أننا نملك قدرًا كبيرًا من المعلومات عن الطريقة التي تكوّن بها الكون منذ الانفجار العظيم، بل وتتسم هذه المعلومات في بعض الحالات بالدقة المتناهية، فإن هناك دائمًا فجوات في هذه المعرفة، وفي تلك الحالة لا بد أن نستخدم الاستدلال المتقن لنستنتج ما حدث. لذا لن يكون هناك تاريخ واحد أو سرد واحد قاطع

لتاريخ الكون؛ وإنما قصص غير موضوعية نوعًا ما مختلفة وتأويلات متعددة.

وكل هذا جعلني أفكر في إمكانية كتابة سرد لقصة الكون وتطوره ومصيره المحتمل باستخدام المنهج الذي كنت سأستخدمه إذا شرعت في كتابة إحدى السير، وذلك بأن أسأل الأسئلة الرئيسية حول الموضوع، ثم أحاول أن أجيب عليها بأفضل طريقة ممكنة، محاولًا ملء الفجوات عند الحاجة باستخدام الاستدلال القائم على المعرفة. كيف بدأ الكون؟ من أين أتت الجُسيمات المادية التي صنعنا منها؟ من أين أتت المجرات؟ كيف تتشكل النجوم والكواكب؟ كيف بدأت الحياة. لدينا فقط إجابات مؤقتة عن هذه الأسئلة (بعضها مؤقتة أكثر من غيرها)، ولكنها كلها إجابات من المرجح أنها ستتحسن تحسنا كبيرًا بما سيحدث من تقدم علمي خلال السنوات العشر التالية. ما لدينا بالفعل من إجابات مؤقتة هو أفضل إلى حد هائل من ألا تكون هناك أي إجابات مطلقًا، وقصة توصلنا إلى هذه الإجابات قصة تستحق في حد ذاتها أن تروى، وفي ذلك أيضًا طريقة جيدة للتمهيد للقصص التي يرجح أنها ستكون عناوين الصحف الرئيسية خلال العقود الآتية.

عندما كتبت تاريخي للعلم منذ القرن السادس عشر[1] استخدمت أسلوبًا يختلف عما هو متبع عند كتابة السير من خلال التركيز على حياة وإنجازات العلماء. في البداية، اعتزمت استخدام الأسلوب نفسه هنا آملًا أن أعطي بذلك فكرة عن طريقة عمل العلم حاليًا عندما أركز على الإسهامات الفردية. إلا أن العلم يؤدَّى في هذه الأيام بطريقة مختلفة. كلما زادت زياراتي للعلماء النشطين اليوم، زاد إدراكي لمدى التغير الكبير في العلم أثناء حياتي. يركز العلماء في مجالات العلوم الفيزيائية في الوقت الحاضر بوجه عام على مشاكل صغيرة نسبيًا أثناء عملهم في فرق كبيرة نوعًا، بحيث إنه غالبًا ما يكون من الصعب تحديد إسهاماتهم الخاصة بهم، أو الزعم بأن المشروع ما كان سينجح هكذا لو أن فردًا آخر كان سيؤدي مهمتهم. على أن الحصيلة ككل

---

[1] كتاب تاريخ العلم، ألان لين، لندن ٢٠٠٢.

تصبح أعظم من مجموع أجزائها، حتى إنه تنبثق عن ذلك صورة متينة متسقة تفرض نفسها وتكاد تكون مكتملة إلى أبلغ حد، وتبين طريقة عمل عالَم الفيزياء، وكيف أن الكون الذي نراه من حولنا يجب أن يكون كما هو. أحد أروع الملامح لهذه القصة هو أن لغز أصل الحياة يقع الآن مباشرة في نطاق علم الفيزياء (وهو الآن أقل إلغازًا إلى حد بعيد مما كان عليه عادة).

لا يصبح مقياس هذا الإنجاز واضحًا إلا عندما نتراجع لننظر من بعيد عن الإسهامات الفردية ناظرين إلى الصورة الكبيرة. هناك «بالفعل» قصة رائعة لسيرة حياة علمية يجب كتابتها، ولكنها سيرة حياة الكون نفسه، وليس الأفراد الذين يسبرون ما تبقى فيه الآن من الألغاز. لما كانت حياة الكون بعيدة عن الوصول إلى نهايتها، فقد اخترت أن أطرح القصة حتى الآن بلغة من البدايات، من بداية الكون كما نعرفها عندما يقرب من ١٤ مليار سنة (١٠^١٠) حتى بداية الحياة على الأرض بعد ذلك بعشرة مليارات سنة. لم أستطع كذلك أن أقاوم اختلاس نظرة إلى المستقبل، للنظر في المصير المرجح للأرض، وهو أمر يثير اهتمامًا له قدره عند سكان كوكبنا، وسكان الكون عمومًا.

بعض الخطوط الخارجية لهذه القصة قد رُسمت مجملة من قبل،[٢] إلا أن الأمر المختلف في علم القرن الحادي والعشرين هو أن الخطوط الخارجية قد مُلئت بدقة (وتغيرت أحيانًا تغيرًا دراميًّا في هذه العملية) بحيث إن الأرقام الرئيسية أو المفتاحية التي تعَين حالة الكون أصبحت معروفة بدقة تصل إلى نسبة من عدد صغير في المائة، أو حتى إلى كسور من الواحد في المائة. تبيّن في الوقت نفسه أن هناك أجزاءً مختلفة من الصورة تتوافق بدقة مذهلة، بحيث نجد مثلًا أن خصائص النيوترون (أحد مكونات نواة الذرة) التي تقاس في المعمل لها علاقة وثيقة حميمة بالأحداث التي وقعت في الانفجار الكبير، وكذلك بمقدار الهيليوم الموجود حاليًّا في النجوم. كما أن مقدار الهيليوم في النجوم يؤثر بدوره في إنتاج العناصر الكيميائية التي انتهت بالوصول إلى أجسادنا، وله كذلك علاقة مهمة بقصة أصل الحياة.

---

[٢] في كتاب سابق لي بعنوان «التكوين» *Genesis* (دار نشر دينت، لندن، ١٩٨٠) وفي كتابات عدة كتاب آخرين.

وذلك هو السبب الآخر الذي دفعني إلى تسمية الكتاب «قصة الكون» بدلًا من «تاريخ الكون». فهو يتناول نشأة الحياة ويطرح السؤال المطلق المتعلق بأصولنا، على الرغم من أن ذلك قد لا يكون واضحًا في الفصول الأولى من الكتاب.

يعد هذا الكتاب سيرة لتاريخ الكون وليس سيرة تاريخ الكون؛ لكن على الرغم من أنه بالقطع سيكون كتابًا تخمينيًّا إلى حد ما، فإنني لا أود أن تظن أنه يقوم على خيالي الشخصي، فالحقائق الواردة هنا تفوق ما ورد به من تخمين. وكأي كاتب سيرة بارع، فإنه قبل تناول هذا المفهوم الجديد حول العالم ومكاننا فيه، علي أن أفكر مليًّا في الأمور التي صار علماء الفيزياء على يقين منها بشأن طريقة عمل الكون، وأن أميز بين ما نظن أننا «نعرفه» وما «نظن» أننا نعرفه.

جون جريبين
مايو/أيار ٢٠٠٦

الفصل الأول

كيف نعرف الأشياء التي نعتقد أننا نعرفها؟

ما الذي يعنيه العلماء عندما يقولون إنهم «يعرفون» ماذا يجري مثلًا داخل إحدى الذرات، أو ماذا حدث في أول ثلاث دقائق من حياة الكون؟ إنهم يعنون أن لديهم ما يسمونه نموذجًا للذرة، أو للكون المبكر أو لأي مما يهتمون به، وأن هذا النموذج يتوافق مع نتائج تجاربهم أو ملاحظاتهم عن العالم. هذا النموذج العلمي ليس تمثيلًا فيزيقيًا للشيء الحقيقي بالطريقة التي يمثل بها نموذج لطائرة طائرة كاملة المقاييس؛ وإنما هو صورة ذهنية تصفها مجموعة من المعادلات الرياضية. وكمثل لذلك فإن الذرات والجزيئات التي تشكل الهواء الذي نتنفسه يمكن وصفها بلغة من نموذج نتخيل فيه أن كل جسيم يكون له شكل متقن بكرة صغيرة مرنة (كرة بلياردو بالغة الصغر)، وكل هذه الكرات الصغيرة ترتد متواثبة إحداها عن الأخرى وعن جدران الوعاء الحاوي لها.

هذه هي الصورة الذهنية، إلا أن هذا هو نصف النموذج فقط؛ إن ما يجعله نموذجًا «علميًا» هو أن طريقة تحرك الكرات وارتدادها متواثبة إحداها عن الأخرى يجري وصفها بمجموعة من القوانين الفيزيائية تكتب بلغة من المعادلات الرياضية. في هذه الحالة، فإن هذه القوانين هي أساسًا قوانين الحركة التي اكتشفها نيوتن منذ أكثر من ثلاثمائة سنة. من الممكن باستخدام هذه القوانين الرياضية أن نتنبأ مثلًا بما سيحدث لضغط الغاز عندما يُحشر في نصف حجمه الأصلي. إذا أجرينا هذه التجربة فسنحصل

على نتيجة (هي في هذه الحالة أن يتضاعف الضغط) تتفق مع ما يتنبأ به النموذج، الأمر الذي يجعل منه نموذجًا صالحًا.

ينبغي بالطبع ألا نندهش من أن النموذج المعياري لأحد الغازات الذي يصفه بلغة من كرات صغيرة ترتد متواثبة إحداها عن الأخرى بما يتفق وقوانين نيوتن يصنع لنا هذا التنبؤ الصحيح بعينه، لأن التجارب قد أُجريت أولًا وصُمم النموذج أو بُني ليتلاءم مع نتائج التجارب. المرحلة التالية لذلك في العملية العلمية هي أن نستخدم النموذج الذي أنشأناه من المقاييس التي أُجريت في مجموعة من التجارب حتى نصنع منه تنبؤات (تنبؤات رياضية دقيقة) حول ما سيحدث للمنظومة نفسها عندما نجري تجارب مختلفة. إذا صنع النموذج التنبؤات «الصحيحة» تحت الظروف الجديدة، فإن هذا يبين أنه نموذج صالح. وحتى إذا أخفق النموذج في صنع التنبؤات الصحيحة فربما لا نضطر لنبذه بالكامل، ذلك أنه لا يزال يخبرنا بشيء مفيد بشأن التجارب الأقدم؛ على أنه في أحسن الأحوال له قدرة تطبيقية محدودة.

الحقيقة أن كل النماذج العلمية لها قدرة تطبيقية محدودة. فأي واحد منها لا يكون هو «الحقيقة». نموذج الذرة كشكل متقن لكرة صغيرة تامة المرونة ينجح جيدًا في حساب تغيرات ضغط الغازات في الظروف المختلفة، ولكننا إذا أردنا أن نصف الطريقة التي تبعث بها الذرة الضوء أو تمتصه، فسنحتاج إلى نموذج للذرة يكون لها فيه على الأقل مكونان اثنان: نواة مركزية بالغة الصغر (يمكن النظر إليها هي نفسها لأغراض معينة باعتبار أن لها شكلًا متقنًا لكرة صغيرة مرنة) تحيط بها سحابة من الإلكترونات. النماذج العلمية تمثيل للواقع، وليست هي الواقع نفسه، وأيًّا كان نجاح أدائها أو دقة تنبؤاتها في الظروف الملائمة، فإنها ينبغي أن تعد دائمًا أنواعًا من التقريب وأدوات للمساعدة على التصور، وليست الحقيقة النهائية. عندما يقول لنا العلماء مثلًا إن نواة الذرة تتألف من جسيمات تسمى البروتونات والنيوترونات، فإن ما ينبغي أن يقولوه حقًّا هو أن نواة الذرة في ظروف معينة تسلك «وكأنها» تتألف من بروتونات ونيوترونات. كبار العلماء يأخذون عبارة «وكأنها» على أنها مسلم بها، ولكنهم يدركون

أن نماذجهم هي حقًّا لا تعدو أن تكون نماذج فحسب؛ صغار العلماء كثيرًا ما ينسون هذا التمييز الحاسم.

هناك فكرة أخرى خاطئة عند صغار العلماء وغير العلميين، فهم كثيرًا ما يعتقدون أن دور العلماء حاليًا هو إجراء تجارب تثبت صحة نماذجهم بدرجة أكثر وأكثر دقة، بما يصل إلى نسبة من مزيد ومزيد من خانات الكسور العشرية. الأمر ليس هكذا مطلقًا! السبب في إجراء تجارب لسبر تنبؤات النماذج التي لم تختبر فيما سبق هو أن نكتشف نقاط ضعف النماذج. إنه لمن أعز الآمال عند أفضل الفيزيائيين أن يعثروا على أخطاء في نماذجهم، لأن هذه الأخطاء — أو الأمور التي لا تستطيع النماذج أن تتنبأ بها بدقة أو لا تستطيع أن تفسرها بالتفصيل — ستلقي الضوء على المواضع التي نحتاج فيها إلى فهم جديد وإلى نماذج أفضل لإحراز التقدم. المثال النموذجي لذلك هو الجاذبية. ظل قانون إسحاق نيوتن عن الجاذبية يُعد أعمق جزء في الفيزياء لما يزيد عن مائتي سنة، ابتداء من ثمانينيات القرن السابع عشر حتى بداية القرن العشرين. على أنه كانت هناك أمور قليلة تبدو ضئيلة الشأن لم يستطع النموذج النيوتوني أن يفسرها (أو يتنبأ بها)، بما في ذلك مدار كوكب عطارد وطريقة انحناء الضوء عندما يمر عبر الشمس. صمم ألبرت أينشتاين نموذجه للجاذبية على أساس نظريته عن النسبية العامة،[1] وهو نموذج يفسر كل شيء يفسره نموذج نيوتن، ولكنه يفسر «أيضًا» تلك التفاصيل الدقيقة لمدارات الكواكب وانحناء الضوء. وبهذا المعنى فإن نموذج أينشتاين أفضل من نموذج نيوتن الأقدم، وهو يصنع تنبؤات صحيحة (خاصة عن الكون عمومًا) لا يصنعها النموذج الأقدم. إلا أن نموذج نيوتن لا يزال هو كل ما نحتاجه عندما نحسب مسار طيران مسبر فضائي من الأرض إلى القمر. «نستطيع» إجراء الحسابات نفسها باستخدام النسبية العامة، ولكن هذا سيكون أكثر إرهاقًا وإملالًا وسيعطينا الإجابة نفسها، إذن فلماذا نزعج أنفسنا بذلك؟

[1] مصطلح «النظرية» كثيرًا ما يستخدم لوصف ما أسميته أنا بالنماذج. وأنا أفضل كلمة النموذج لأنها بالنسبة لغير العلماء تحمل معها معاني أقل تضليلًا مما تحمله كلمة «النظرية»، إلا أنه في بعض الحالات، وبوجه خاص في حالة نظرية أينشتاين، نجد أن كلمة النظرية تشكل إلى حد بعيد جزءًا من الاسم بحيث لا يمكن تفاديها. وعلى أي حال فإن كل ما قلته عن النماذج العلمية ينطبق أيضًا على النظريات العلمية. (المؤلف)

يدور معظم هذا الكتاب حول أمور «نعتقد» أننا نعرفها؛ نماذج تبدو صالحة بمدى ما تُختبر به، ولكنها تتضمن العلم المنبثق، وهو علم لا يزال هناك المزيد من الاختبارات الكثيرة التي يجب إجراؤها عليه. من المؤكد أن بعض هذه النماذج سيتطلب تعديلًا في ضوء المزيد من التجارب والملاحظات الأخرى عن الكون؛ وقد يلزم نبذ بعضها بالكامل وأن يحل مكانه طرائق جديدة للنظر في الأمور. ولا يختلف هذا عما حدث مع المؤرخين وكتاب السير الذين تناولوا حياة روبرت هوك، وهو واحد من أعلام الثورة العلمية في القرن السابع عشر، إذ اضطروا أخيرًا إلى تنقيح أفكارهم عن هذا العالم (أو نماذجهم إذا شئت) بعد اكتشاف وثيقة هامة ظلت مفقودة طوال قرون، وتتناول الوثيقة تفاصيل بعض الأحداث في حياة هوك العلمية.

على أننا حتى نعد المشهد لوصف المسار الذي سيتجه إليه العلم في القرن الحادي والعشرين، سنحتاج إلى أن نبدأ من الأمور التي نعتقد أننا «نعرفها»؛ نماذج نشأت أساسًا في القرن العشرين، وكانت جد ناجحة في التلاؤم مع نتائج التجارب والملاحظات، حتى إن لدى العلماء إيمانًا كبيرًا بها يماثل إيمانهم بنماذج كرة البلياردو للغازات في نموذج نيوتن للجاذبية (في نطاق قيوده المحددة المعروفة). هذه النماذج هي — مثل نموذج نيوتن — قريبة جدًّا من الكمال في وصفها للكون الفيزيائي في نطاق المجالات المعينة التي يعرف عن هذه النماذج أنها تنطبق عليها. ومن المهم هنا، كما هو مهم في نموذج نيوتن، أننا نعرف أين تكون حدود القدرة التطبيقية لهذه النماذج.

يحب الفيزيائيون الإشارة إلى أوصاف العالم الناجحة نجاحًا بالغًا (أو الأولى أنها الملامح الخصوصية للعالم) على أنها نماذج «معيارية». نموذج كرات البلياردو عن الغازات (ويعرف أيضًا بأنه النظرية الحركية لأنه يتناول الجسيمات وهي في حركة) هو نموذج معياري. ولكن عندما يتحدث الفيزيائيون عن النموذج المعياري، فإنهم يشيرون بذلك إلى أحد أعظم انتصارات العلم في القرن العشرين، أي يشيرون إلى النموذج الذي يصف سلوك الجسيمات والقوى بمستويات ما تحت الذرة. هذا وقد بدأ ذلك أساسًا في العقد الثاني من القرن العشرين، عندما اكتشف الفيزيائي الدنمركي نيلز بور نموذجًا جديدًا للذرة. سبق أن وصفتُ النشأة التاريخية

لفيزياء الكم في كتابي «بحثًا عن قطة شرودينجر» (١٩٨٤)، ولا أنوي هنا الدخول في تفاصيل ذلك؛ على أنه لما كان النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات يتأسس كليًّا على فيزياء الكم، فإن من المناسب أن نذكر ملخصًا موجزًا له. قد يبدو بعض هذا لأول وهلة شيئًا مألوفًا لبعض القراء؛ ولكنني أناشدهم التأني معي، لأني آمل أن القارئ قد يجد أن تناولي لهذه القصة المألوفة لا يماثل تمامًا ما يعتقد أنه يعرفه.

أول خطوة تجاه هذا الفهم الجديد للفيزياء اتخذها ماكس بلانك في ألمانيا عند بداية القرن العشرين. اكتشف بلانك أن الطريقة الوحيدة التي يمكن بها تفسير الملاحظات عن طريق إشعاع الضوء من الأجسام الساخنة هي بأن ينبعث الضوء في تكتلات صغيرة، حزم تسمى الكمات. كان العلماء وقتها ينظرون إلى الضوء كشكل من موجة، ذبذبة كهرومغناطيسية، وذلك لأن ملاحظة سلوك الضوء في تجارب كثيرة تتفق مع تنبؤات نموذج الموجة. في أول الأمر، لم يكن بلانك نفسه أو أي من معاصريه يعتقد أن الضوء «موجود» في شكل تكتلات صغيرة، وإنما وجدوا فحسب أن خواص المادة — أي خواص الذرات — تعني أنه يمكن فقط بعثه (أو امتصاصه) بمقادير معينة. نستطيع أن نشبه ذلك بصنبور يقطر منه الماء. حقيقة أن الماء تسقط قطراته من الصنبور في شكل «تكتلات» بالغة الصغر لا تعني أن الماء في الخزان الذي يغذي الصنبور يوجد فقط في شكل قطرات منفصلة. في ١٩٠٥ كان ألبرت أينشتاين أول فرد في الأزمنة الحديثة يأخذ جديًّا فكرة أن الضوء يوجد بالفعل في شكل تكتلات صغيرة، جسيمات للضوء أصبحت تعرف بالفوتونات، وظل أينشتاين لما يقرب من السنوات العشر التالية وهو يشكل رأي أقلية هي أساسًا من فرد واحد.[٢] إلا أنه ثبت في النهاية أن سلوك الضوء في بعض التجارب يتوافق بالفعل مع تنبؤات نموذج الجسيم. ومن ثم فإن نموذج الجسيم لا بد أنه نموذج صالح أيضًا. لا توجد تجربة تبين أن الضوء يسلك في الوقت نفسه كموجة وكجسيم، ولكن الضوء يمكنه أن يتوافق مع تنبؤات أي من النموذجين حسب طبيعة التجربة.

---

[٢] طرح نيوتن نموذجًا مقبولًا لجسيم الضوء، إلا أن نموذج الموجة ساد بدلًا منه.

هذا أمر يستحق أن نجعله واضحًا، لأن فيه مثلًا ممتازًا للقيود على النماذج. ينبغي ألا يقول (أو يعتقد) أحد بأي حال إن الضوء «يكون» موجة، أو«يكون» جسيمًا. كل ما يمكننا قوله هو أن الضوء في الظروف الملائمة يسلك «وكأنه» موجة أو يسلك «وكأنه» جسيم، بما يماثل تمامًا أن الذرة في ظروف معينة تسلك «وكأنها» كرة صغيرة صلبة، في حين أنها في ظروف أخرى تسلك «وكأنها» مكونة من نواة بالغة الصغر تحيطها سحابة من الإلكترونات. ليس هناك أي تناقض أو تعارض في ذلك. القيود المحدَّدة أمر كامن في نماذجنا وفي تصورنا البشري، لأننا نحاول أن نصف شيئًا، هو ككل لا يشبه أي شيء مما نخبره بحواسنا. التشوش الذي نشعر به عندما نحاول تصور كيف أن الضوء يمكنه أن يكون معًا موجة وجسيمًا، هو جزء مما يسميه ريتشارد فينمان الفيزيائي الأمريكي بأنه «انعكاس لرغبة غير محكومة، وإن كانت متغطرسة، في أن نرى الأمر بلغة من شيء مألوف». الضوء هو بالفعل ظاهرة كمومية يمكن وصفها على نحو فعال للغاية بلغة من معادلات رياضية، ولكن لا توجد بشأنه أي صورة واحدة في حياتنا اليومية تعطينا فكرة عما يكونه. عالم الكم كله على هذا المنوال، وأول إسهام عظيم لنيلز بور في الفيزياء هو أنه دمج رياضيات فيزياء الكم في نموذج للذرة دون أن يصيبه ذلك بانزعاج بالغ حول ما إذا كان هذا النموذج له معنى معقول بلغة من الحياة اليومية.

مع بداية القرن العشرين عرف العلماء أن كل شيء على الأرض مصنوع من الذرات، وأن هناك نوعًا واحدًا من الذرة لكل من العناصر الكيمائية؛ ذرات الأكسجين، وذرات الذهب، وذرات الهيدروجين، وهلم جرًّا. وهم يعرفون أيضًا أن الذرات ليست غير قابلة للانقسام، كما كان يعتقد ذات يوم، وإنما هناك أجزاء منها تسمى الإلكترونات يمكن فصلها بعيدًا عنها في الظروف المناسبة. في ذلك الوقت كان النموذج المفضل للإلكترون يصفه على أنه جسيم بالغ الصغر، وقد بينت التجارب أن الإلكترونات تسلك بالفعل في الحقيقة وكأنها جسيمات بالغة الصغر. الأحجية التي حلها بور هي كيف أن الضوء يشَع (أو يمتص) بواسطة أنواع مختلفة من الذرات المفردة؛ وبالإضافة إلى ذلك، فإن نموذج بور يفسر الأحجية بمستوى فيه تفاصيل أكثر من دراسة

بلانك عن الضوء الذي تبعثه أشياء متوهجة مصنوعة من أنواع ذرات كثيرة مختلفة. عندما يُسخن عنصر نقي (مثل الصوديوم) في لهب، فإنه يصدر إشعاعًا عند طول موجات أو ألوان محددة بدقة، وينتج عن هذا نمط من الخطوط في طيف الضوء المرئي، الذي يشمل كل ألوان قوس قزح (الحقيقة أن قوس قزح «هو بالفعل» طيف). في حالة الصوديوم تكون الخطوط في الجزء البرتقالي الأصفر من قوس قزح؛ على أن كل عنصر (بما يعني كل نوع من الذرة) ينتج نمطه الخاص المميز من الخطوط، وهو نمط فريد مثل بصمة الإصبع ويشبه شفرة الخطوط العمودية المطبوعة على السلع. مزيج الألوان الذي نراه في قوس قزح هو نتيجة أنواع كثيرة مختلفة من الذرات كلها تصدر إشعاعًا عند أطوال موجات مختلفة. ينتهي هذا المزج عادة بأن يعطي مظهر اللون الأبيض، ولكن الألوان تنفصل بالطريقة التي ينحني بها الضوء من خلال قطرات المطر، أو كما بينت أبحاث إسحاق نيوتن تنفصل الألوان باستخدام منشور ثلاثي من الزجاج.

والآن، فإن الضوء شكل من الطاقة، وطاقة الضوء التي تبعثها الذرات لا بد أن تأتي من داخل الذرات (من أكثر القوانين تأسسًا في الفيزياء أن الطاقة لا يمكن تخليقها من لا شيء، وإن كانت هذه القاعدة نفسها لها قيود تحددها كما سنرى فيما بعد). أدرك بور أن الطاقة تأتي من إعادة تنظيم الإلكترونات في الجزء الخارجي من الذرة. (ومن ثم فإن الضوء هو بالمعنى الحرفي طاقة ذرية، كذلك فإن ما أصبح يعرف خلال منعطف من التاريخ كطاقة ذرية، ينبغي حقًا أن يسمى بأنه طاقة نووية). تحمل الإلكترونات شحنة سالبة، بينما تحمل نواة الذرة شحنة موجبة، وهكذا فإن الإلكترونات تنجذب إلى النواة بطريقة تماثل أن جرمًا فوق الأرض ينجذب بواسطة الجاذبية للأرض نفسها. عندما نحمل ثقلًا ونحن نصعد سلمًا، يكون علينا أن نعمل شغلًا (أي نُدخل طاقة) لنحرك الثقل مسافةً تبتعد أكثر من مركز الأرض. عندما نسقط ثقلًا من نافذة بأعلى، تنطلق هذه الطاقة، وتتحول أولًا إلى طاقة حركة الثقل الساقط، ثم بعدها عندما يصطدم الثقل بالأرض، تتحول الطاقة إلى حرارة، وتسخُن الأرض قليلًا، إذ تجعل الذرات والجزيئات عند موضع الارتطام تهتز فيما حولها. طرح

بور أنه بمثل هذه الطريقة، إذا تحرك إلكترون في الجزء الخارجي من إحدى الذرات ليقترب أكثر من النواة، فإن الطاقة ستنطلق (كضوء في هذه الحالة). إذا كان هناك إلكترون قريب من النواة وامتص طاقة (ربما تكون من الضوء، أو لأن الذرة قد سُخنت) فإنه سيثب بعيدًا إلى الخارج. ولكن لماذا ينبغي عندما تنبعث الطاقة أو تمتص أن يكون ذلك فحسب عند أطوال موجات محددة بدقة، تقابل مقادير طاقة محددة بدقة؟

في النموذج الذي أنشأه بور يتم تصور الإلكترون على أنه يتحرك حول النواة بطريقة تذكر بطريقة دوران الكواكب حول الشمس. إلا أنه في حين أن أحد الكواكب يستطيع من حيث المبدأ أن يدور في مدار حول الشمس على أي مسافة بعد منها، فإنه حسب بور «يُسمح» فقط بوجود مدارات معينة للإلكترونات، بما يبدو وكأن أحد الكواكب يستطيع فقط أن يشغل مدار الأرض أو مدار المريخ، ولا يستطيع أن يشغل مدارًا في أي مكان فيما بينهما. ثم طرح بور أن الإلكترون يمكن أن يثب من أحد المدارات إلى الآخر (وكأن المريخ قد وثب إلى مدار الأرض) ويبعث في هذه العملية مقدارًا محددًا بدقة من الطاقة (يقابل طول موجة ضوء محدد بدقة). ولكن الإلكترون لا يستطيع أن يثب إلى مدار بيني فيما بين المدارات الأصلية، ليبث مقدار طاقة بينية، لأنه ليس هناك وجود لمدارات بينية. وفر بور بالطبع الرياضيات اللازمة لدعم ما طرحه، وقد تأسست على دراسات الأطياف، وطُورت الفيزياء اللازمة بواسطة المزيد من التجارب والملاحظات. على أن المهم هنا هو أن بور عثر على نموذج يستطيع أن يتنبأ بالمكان الذي ينبغي أن توجد فيه الخطوط في أطياف الذرات، حتى وإن كانت فكرة ما أصبح يعرف بأنه المدارات «المكمّاة»[٣] Quantized هي فكرة لا معنى لها بلغة من خبرة حياتنا اليومية. يساوي ذلك في إثارة الحيرة، أنه حسب هذا النموذج تحدث التغيرات وكأن أحد الإلكترونات يختفي من أحد المدارات ليظهر في التو في مدار آخر دون أن يجتاز بأي حال المسافة فيما بينهما. على الرغم من أن العلماء استغرقوا زمنًا طويلًا لاستيعاب

[٣] المكماة أي المحسوبة بقوانين ميكانيكا الكم. (المترجم)

هذه النقطة، فإن بور قد أوضح أنه لا يلزم لأي نموذج أن يكون معقولًا حتى يكون نموذجًا صالحًا؛ كل ما يكون عليه أن يؤديه هو أن يصنع تنبؤات (تتأسس على رياضيات سليمة وفيزياء تلاحظ) تتوافق مع نتائج التجارب.

كثيرًا ما يعتبر الآن أن نموذج بور عن الذرة يكاد يكون عتيقًا ومن طراز قديم. تغيرت نظرة الفيزيائيين الآن للإلكترون تغيرًا كبيرًا، على الأقل منذ أن اكتُشف في عشرينيات القرن العشرين أن الإلكترون في بعض الظروف التجريبية يسلك وكأنه إحدى الموجات. هناك ثنائية من الموجة-الجسيم بشأن الإلكترون تمامًا مثل الضوء (بل في الحقيقة مثل أي كيان آخر في عالم الكمومية). لا يمكننا القول إن الإلكترون «هو» موجة، أو «هو» جسيم، يمكننا فقط أن نقول إنه أحيانًا (بطريقة يمكن التنبؤ بها) يسلك وكأنه موجة، وأحيانًا يسلك كأنه جسيم. أدى هذا الاكتشاف إلى فكرة أن الإلكترونات في الذرة تشغل سحابة غائمة منتشرة حول النواة؛ تحدث تغيرات في طاقة السحابة بطرائق أكثر رهافة من أن تكون عن طريق جسيم بالغ الصغر يتواثب من أحد المدارات إلى الآخر. هذا نموذج أكثر تعقدًا، ينجح تمامًا عندما نريد أن نفسر كيف تنضم الذرات معًا لتصنع جزيئات وهو بذلك نموذج يشكل الأساس لكل فهمنا الحديث للكيمياء. ولكن كما أن نموذج نيوتن هو كل ما نحتاج إلى معرفته عن الجاذبية عندما نحسب مسار قذف لمسبار فضاء يذهب إلى القمر، فإنه بمثل ذلك تمامًا يظل نموذج بور ناجحًا إذا كان كل ما نريد أن نفعله هو أن نفسر الخطوط التي نراها في أطياف المواد الساخنة، مثل الصوديوم (أو الشمس). نماذجنا نادرًا ما تموت، الأمر فحسب أن مدى فائدتها مقيد.

هذا هو كل ما علينا أن نقوله الآن بشأن الإلكترونات، لأن الإلكترون في النموذج المعياري يعتبر أحد اللبنات الأساسية لبناء المادة؛ كيان أولي حقًا لا يُصنع من أشياء أصغر. إلا أن هذا لا يصدق على النواة. النموذج المعياري كما أنه «يشرح» ما تكونه النواة — أي يوفر لنا نموذجًا عمليًّا لوصفها — فإنه يطرح أيضًا تبصرًا نافذًا بشأن القوى التي تعمل فيما بين أنواع الكيانات الأولية التي تعودنا أن نفكر فيها كجسيمات.

من الصعب أن نتجنب استخدام مصطلح «الجسيم»، على الأقل لبعض الوقت، عندما نتحدث عن كيانات أولية مثل الإلكترونات، ولن يحدث دائمًا أن نحدد وصفًا لها. ولكن من المهم أن نتذكر أن استخدامنا لهذه الكلمة لا يعني أن هذه الكيانات ينبغي أن نفكر فيها على أنها فحسب كرات صغيرة صلبة أو تركيزات من الكتلة والطاقة عند نقطة ما. فهي وإن كانت تسلك على هذا النحو في بعض التجارب، إلا أنها لا تفعل ذلك في تجارب أخرى. يستخدم أحيانًا مصطلح «جسيموجة» Wavicle لمحاولة توصيل الوصف المميز لطبيعة الموجة-الجسيم المزدوجة للأشياء الكمومية، إلا أنني غير مقتنع بأن هذا أمر ناجح. ومن الجانب الآخر فإن الفيزيائيين لديهم بالفعل بديل لكلمة «القوة» هو بديل صالح تمامًا، كما أنه صالح أيضًا من حيث إن «القوى» الكمومية تعد غريبة عن مصطلحات الحياة اليومية بمثل غرابة «الجسيمات» الكمومية.

نحن جميعًا على دراية بقوتين من قوى الطبيعة هما الجاذبية والكهرومغناطيسية. نحن نشعر بأن الأرض تشدّنا إلى أسفل، كما أننا نرى أحد المغناطيسات وهو يلتقط جسمًا معدنيًّا، أو أننا نشحن مشطًا بلاستيكيًّا بأن نمرره خلال شعرنا ثم نستخدم الكهرباء الاستاتيكية التي تولدت فيه لالتقاط قطع ورق بالغة الصغر. على أنه كما تبين هذه الأمثلة فإن القوى تعمل دائمًا بين جسمين اثنين (أو أكثر)، فالأرض تشدنا لأسفل، والمغناطيس يلتقط مسمارًا. هناك تفاعل بين الأجسام المشاركة في الأمر، وهذا يعطي للفيزيائيين مصطلحهم المفضل «التفاعل المتبادل» Interaction، لوصف ما يجري. قد يبدو من الأمثلة التي أعطيناها أن هناك ثلاثة تفاعلات تمارس في الحياة اليومية، وذلك لأن المغناطيسية والكهرباء لهما ظاهريًّا خصائص مختلفة. إلا أنه حدث في القرن التاسع عشر أن اكتشف الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل، على أساس أبحاث مايكل فارادي اللندني؛ مجموعة من المعادلات تصف الكهرباء والمغناطيسية معًا داخل إطار نموذج واحد. فهما في الواقع وجهان مختلفان لنفس التفاعل، مثل وجهين اثنين لقطعة عملة واحدة.

على أن هناك اختلافات عديدة حقيقية ومهمة بين التفاعل الجذبوي والتفاعل الكهرومغناطيسي. الجاذبية أضعف بكثير جدًّا جدًّا من

الكهرومغناطيسية. يتطلب الأمر مثلًا شدًّا من الأرض بأسرها للإبقاء على دبوس من الصلب لأسفل فوق الأرض، ولكن مغناطيسًا في لعبة طفل يستطيع بسهولة أن يتغلب على هذا الشد ويرفع الدبوس إلى أعلى. حيث إن الإلكترونات ونوى الذرات تحمل شحنة كهربائية، وحيث إن قوة الشد الجذبوي من إحدى الذرات على الأخرى هي بقدر ضئيل جدًّا إلى حد يمكن تجاهله، فلهذا كله نجد أن التفاعلات المهمة بين الذرات تكون كلها كهرومغناطيسية. ومن ثم فإن القوى الكهرومغناطيسية تجعل جسمنا يتماسك معًا وهي التي تجعل عضلاتنا تعمل. عندما تلتقط تفاحة من فوق مائدة يعني ذلك أن التفاعلات الكهرومغناطيسية في عضلاتك تتغلب على التفاعل الجذبوي بين التفاحة والأرض. وهكذا فإنك بأحد المعاني الحقيقية أكثر قوة من الكوكب، بفضل من التفاعلات الكهرومغناطيسية.

على الرغم من أن الجاذبية ضعيفة، فإنها تعمل على مدى مسافة طويلة جدًّا. التفاعل بين الشمس والكواكب يُبقي الكواكب في مداراتها، والشمس بطريقة مماثلة هي نفسها جزء من منظومة من مئات المليارات العديدة من نجوم تشكل مجرة في شكل قرص يبلغ عرضه تقريبًا مائة ألف سنة ضوئية، يدور حول مركزه ويتماسك معًا بواسطة الجاذبية. التفاعلات الكهرومغناطيسية، من حيث المبدأ، لها المدى الطويل نفسه لفعلها. إلا أن هناك اختلافًا آخر بين هذه التفاعلات والجاذبية، وهو أنها تأتي في أنواع مختلفة يلغي أحدها الآخر. الشحنة الموجبة في نواة إحدى الذرات تلغيها الشحنة السالبة للإلكترونات، ومن ثم فإنه يبدو من أي مسافة كبيرة — كبيرة بالمقارنة بحجم الذرة — أن الذرة متعادلة كهربائيًّا، بدون أي شحنة عامة. وبمثل ذلك الأقطاب المغناطيسية الشمالية تكون دائمًا مصحوبة بأقطاب مغناطيسية جنوبية، وعلى الرغم من أن المجالات المغناطيسية للأجرام مثل الشمس والأرض تمتد فعلًا في الفضاء إلى حد ما، فإننا نجد بالمقاييس الكونية أنه لا يوجد تأثير مغناطيسي عام يشد الأشياء معًا أو يدفعها متباعدة.

هناك شيء آخر يميز الكهرومغناطيسية عن الجاذبية. الجاذبية دائمًا تشد. إلا أنه على الرغم من أن الشحنات الكهربائية المتضادة تتجاذب

وكذلك أيضًا الأقطاب المغناطيسية المتضادة، فإن الشحنات المتماثلة هي والأقطاب المتماثلة يتنافر أحدها مع الآخر، وهذا أمر اكتشفناه جميعًا ونحن أطفال عندما كنا نحاول أن نحشر معًا القطبين الشماليين لمغناطيسين مختلفين. وهكذا فإن الفيزيائيين حتى قبل أن يحاولوا إجراء أبحاث عن عالم الكمومية، كانوا يعرفون أن التفاعلات (أو القوى) يمكن أن يكون مدى فعلها طويلًا أو قصيرًا، وأنها يمكن أن تكون مصحوبة بأنواع مختلفة من «الشحنة»، وأنها يمكنها أن تتجاذب أو تتنافر. وفيما هو أكثر رهافة، فإننا نرى أن التفاعلات لا تؤثر كلها بالطريقة نفسها في كل شيء. الجاذبية كما يبدو شاملة في تأثيرها، وتؤثر فعلًا في كل شيء. أما تأثيرات الكهرباء والمغناطيسية فلها فعلها في أنواع معينة فحسب من الأشياء. أصبح لهذا كله فائدته عندما أخذ الفيزيائيون يسبرون ما في داخل النواة.

الطريقة التي يسبر بها الفيزيائيون داخل النواة هي أن يطلقوا حزمًا من الجسيمات — وهذا مصطلح يستخدم لعدم وجود مصطلح أفضل — فيطلقون هذه الحزم على النوى وعلى الجسيمات تحت النووية، ويقيسون الطريقة التي تتواثب بها متباعدة. كلما زادت الطاقة الموجودة في الجسيمات الآتية للداخل، زادت دقة التفاصيل التي يمكن تحديدها في «الهدف». كان هذا يتم أولًا في فترة مبكرة من القرن العشرين باستخدام جسيمات تنتج طبيعيًّا من عمليات النشاط الإشعاعي. مع تنامي التكنولوجيا صُقل هذا التكنيك بأخذ جسيمات مثل الإلكترونات وعُجِّل بها إلى طاقات مرتفعة جدًّا، باستخدام مجالات مغناطيسية في ماكينات سميت تسمية منطقية للغاية بمعجلات الجسيمات. أدى هذا بدوره إلى إنشاء معجلات هائلة مثل معجل «سيرن» (المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية) بالقرب من جنيف، حيث تستمر إلى الآن أبحاث الطليعة عن طبيعة المادة والتفاعلات (أو «قوى الطبيعة»).

اكتُشفت النواة نفسها في تجارب أجريت في كمبردج عند بداية عشرينات القرن العشرين، وبعدها أدت الخطوة التالية في عشرينيات القرن إلى اكتشاف أن النواة تستجيب لهذا السبر وكأنها كرة قد صنعت من نوعين من الجسيمات، البروتونات والنيوترونات التي تلتصق معًا مثل عناقيد عنب أوثق حزمها.

نواة أبسط ذرة، أي الهيدروجين، تتكون بالفعل من بروتون واحد، ولكن النوى الأخرى كلها تحوي نيوترونات مثلما تحوي بروتونات، اليورانيوم مثلًا في شكله الأكثر شيوعًا يحوي ٩٢ بروتونًا و١٤٦ نيوترونًا. كل بروتون فيه مقدار من الشحنة الموجبة يساوي مقدار الشحنة السالبة على إلكترون واحد، ومن ثم فإن الذرات المتعادلة يكون عدد البروتونات فيها مماثلًا بالضبط لعدد الإلكترونات. كل نيوترون، كما يدل اسمه، متعادل كهربائيًا. ظهر حينها سؤال واضح، ما السبب في أن التنافر بالتفاعل بين كل البروتونات الموجبة الشحنة لا يؤدي إلى تفجر النواة لتتفكك؟ الإجابة الواضحة، التي أبدتها التجارب فيما بعد، هي أنه لا بد من وجود تفاعل بالجذب، لم يسبق أن تبادر للذهن، يتغلب على التنافر الكهربائي ويبقي على النواة متماسكة معًا. هذا التفاعل أقوى من التفاعل الكهرومغناطيسي، ولهذا فقد أصبح معروفًا بأنه التفاعل القوي (أو القوة القوية). لا يمكن اكتشاف أي أثر من تأثيرات هذا التفاعل عند مسافة بعيدة عن النواة، ولهذا فقد كان من الواضح أنه ولا بد له مدى فعل لمسافة قصيرة، بحيث يمتد تأثيره فحسب عبر قطر نواة كبيرة. وهذا هو السبب في أنه لا توجد نواة أكبر كثيرًا من نواة اليورانيوم. إذا أردنا مثلًا يصور ذلك، دعنا نتخيل محاولة لأن نلصق معًا ما يزيد عن حوالي ٢٤٠ بروتونًا ونيوترونًا: سنجد أن البروتونات على الجانبين المتقابلين للكرة ستظل تتنافر بقوة أحدها عن الآخر بواسطة التفاعل الكهرومغناطيسي، ولكنها ستكون منفصلة بمسافة أكبر من أن تشعر بقوة جذب التفاعل القوي.

الطاقات اللازمة للسبر داخل البروتونات والنيوترونات (التي تسمى معًا بالنيوكليونات Nucleons هي طاقات كبيرة كبرًا بالغًا حتى إنها استغرقت عقودًا — من ثلاثينيات إلى ستينيات القرن العشرين — لينشأ نموذج موثوق به عما يجري داخل هذه الجسيمات. انبثقت هكذا صورة تتسق مع نموذج يتألف فيه كل واحد من النيوكليونات من ثلاثة كيانات أولية حقًا (أولية مثل الإلكترونات) سميت بالكواركات، أدت تجارب سبر البروتونات والنيوترونات إلى دعم تنبؤات بنموذج يوجد فيه نوعان من الكواركات، سميا باسمي «علوي» و«سفلي». يُعد البروتون مكونًا من كواركين علويين وكوارك

سفلي، في حين أن النيوترون مكون من كواركين اثنين سفليين وواحد علوي. كل كوارك سفلي له شحنة قدرها ١/٣ شحنة الإلكترون، بينما كل كوارك علوي له شحنة قدرها ٢/٣ شحنة البروتون، ويؤدي حاصل جمع الأرقام إلى تفسير ما يلاحظ من شحنات للبروتونات والنيوترونات.

ولكن ما هو السبب في أنه لم يتم قط الكشف عن كواركات فردية، أو أي جسيمات لها شحنة من كسور؟ يفسر النموذج هذا الأمر (وتدعم التجارب هذا التفسير) بأن يطرح أن أزواج أو ثلاثيات الكواركات «محبوسة» داخل جسيمات مركبة مثل البروتونات والنيوترونات، بواسطة تفاعل يغدو أكثر قوة كلما كانت الكواركات متباعدة على مسافة أكبر. الجاذبية والكهرومغناطيسية تغدو كل منهما أكثر ضعفًا عند المسافات الأكثر بعدًا، إلا أننا جميعًا على دراية بنوع من قوة تزداد شدتها على المسافات الأبعد. عندما تمط رباطًا مطاطيًا «أستك» عاديًا سيقاوم جهودك كلما أخذت تمطه بقوة أكبر وأكبر، حتى نقطة معينة يُقطع عندها الرباط. الكواركات تسلك وكأنها ممسوكة لجيرانها المباشرين بأربطة من أساتك لينة وهي تتحرك سريعًا منسابة فيما حولها داخل النواة، ولكنها تُشد للعودة بحدة عندما يتحرك بعيدًا أحدها عن الآخر. يمكننا حتى أن نمضي بالتشبيه لنصل إلى تقطع أربطة الأستك. إذا وجُهت طاقة كافية لتحريك أحد الكواركات — كأن يحدث مثلًا أن يرتطم به جسيم يتحرك سريعًا آتيًا من الخارج في تجربة لأحد المعجلات — فإن الروابط المتبادلة مع الجيران ستنكسر بالفعل. على أنه حسب معادلة أينشتاين المشهورة أن الطاقة = الكتلة × مربع السرعة (ط = ك س٢ أو $E = mc^2$) فإن هذا يحدث فقط إن كان هناك طاقة فائضة (E) تكفي لصنع كواركين جديدين (كتلة كل منهما هي m). تذهب كل الطاقة الإضافية في صنع هذين الكواركين الجديدين، على جانبي عملية الكسر، لهذا لا يمكننا أن نكتشف أي كوارك منفصل.

هذا عمل يعني صنع الجسيمات من طاقة خالصة (أو إذا شئت فإن المعادلة هنا هي الكتلة = الطاقة/مربع السرعة أو $m = E/C^2$) بدلًا من أن تكون $E = mc^2$، وهذا في حد ذاته له أهمية حاسمة في فهمنا للعالم تحت الذري. ما يحدث في أجهزة تصادم الجسيمات أن حزمًا من

جسيمات مفعمة بالطاقة تصطدم اصطدامًا مباشرًا إحداها بالأخرى أو تصطدم بأهداف ساكنة. عندما يحدث ذلك، ينتج عنه أن تنتهي الجسيمات السريعة الحركة إلى التوقف، وتنطلق طاقة الحركة التي وضعت داخل الجسيمات في شكل وابل من جسيمات جديدة. هذه «ليست» جسيمات كانت موجودة بأي معنى «داخل» الجسيمات الأصلية وتم خروجها مندفعة نتيجة الاصطدام، وإنما هي جسيمات جديدة صنعت بالمعنى الحرفي من طاقة خالصة. معظم الجسيمات التي تصنع بهذه الطريقة تكون غير مستقرة وتتحلل إلى جسيمات أقل كتلة، وتصل في آخر الأمر إلى الجسيمات المعتادة من البروتونات والنيوترونات، والإلكترونات. إلا أن الطريقة التي تتحلل بها الجسيمات توفر لنا المفاتيح لحل ألغاز بنيانها الخاص الداخلي، وقد أدى هذا إلى تحسين النموذج المعياري.

الخطوة الأولى هي العثور على نموذج يصف التفاعل «القوي». إن التفاعل الذي يحبس الكواركات داخل النيوكليونات يُعد التفاعل القوي الحقيقي، القوة ما بين النيوكليونات، في حين أن التفاعل القوي الأصلي يُرى كأثر ضعيف لهذا التفاعل القوي الحقيقي، يتسرب للخارج من النيوكليونات ليؤثر في جيرانها. ما إن أصبح الدليل الداعم لنموذج الكوارك دليلًا مقنعًا، حتى تمكن الفيزيائيون بسرعة من التوصل إلى نموذج للتفاعل القوي الذي يعمل بين الكواركات وذلك لأنهم في وقت سابق في أربعينيات القرن العشرين كانوا قد أنشئوا نموذجًا دقيقًا إلى حد رائع للطريقة التي تؤثر بها الجسيمات المشحونة كهربائيًا كالإلكترونات والبروتونات أحدها في الآخر من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي.

تأسس هذا النموذج على فكرة المجال، وهي فكرة مألوفة في سياق المجال المغناطيسي، تأثير ينتشر خلال الفضاء من مصدر ما. في حالة المجال المغناطيسي نستطيع حتى أن نعطي صورة بصرية عما يجري بأن نضع قضيبًا مغناطيسيًا تحت صفحة ورق، وننثر برادة حديد فوق الورقة، ونطرق الورقة برفق لنجعل البرادة ترتب نفسها في أنماط منحنية تتبع «خطوط القوة» في المجال المغناطيسي. نظرية المجال الحديثة تدمج أفكارًا من الفيزياء الكمومية، وهي لهذا السبب تسمى نظرية المجال الكمومية. هناك

جزء خاص من الفيزياء الكمومية يدخل في نظرية التفاعل الكهرومغناطيسي، وهو أن الضوء — و«الضوء» هنا لا يعني فحسب الضوء المرئي وإنما يعني أي شكل من الإشعاع الكهرومغناطيسي، بما في ذلك موجات الراديو، وأشعة إكس، وما إلى ذلك — هذا الضوء يأتي في شكل كمات تسمى الفوتونات. الفوتونات بلغة الفيزياء الكمومية تسمى كمات المجال وتعد أجزاء من المجال تمت «استثارتها» بمُدخل من الطاقة.

في ثلاثينيات القرن العشرين أنشأ الفيزيائيون فكرة أن التفاعلات الكهرومغناطيسية يمكن وصفها بلغة من تبادل الفوتونات بين الجسيمات المشحونة. النسخة المبكرة من هذا النموذج صنعت تنبؤات عن سلوك الجسيمات المشحونة التي تكون قريبة الصلة بالخصائص التي تلاحظ في التجارب ولكنها لا تتوافق تمامًا مع قياسات ما يجري في التفاعلات بين الجسيمات المشحونة. على أنه في أربعينيات القرن العشرين، تم حل هذه التناقضات، وانبثقت النظرية الحديثة للكهروديناميات الكمومية بأن أدخل على المسرح أحد أغرب الجوانب في عالم الكمومية، وهو عدم اليقين.

عدم اليقين الكمومي هو في الواقع أمر منضبط ودقيق دقة بالغة. أنشأ هذه الفكرة ورنر هايزنبرج الفيزيائي الألماني في أواخر عشرينيات القرن العشرين، وذلك في البداية بلغة من خصيصتين مألوفتين للجسيمات: موضع الجسيمات وكمية حركتها، وهي قياس لاتجاه وسرعة حركتها. تعودنا في حياتنا اليومية على فكرة أننا نستطيع من حيث المبدأ أن نقيس معًا في الوقت نفسه موضع وكمية حركة أحد الأجسام (مثل كرة البلياردو النموذجية). نحن نعرف أين يكون الجسم وكذلك أيضًا نعرف في «الوقت نفسه» إلى أين يذهب. أدرك هايزنبرج أن الكيانات الكمومية مثل الإلكترونات والفوتونات لا تسلك هكذا، وهذا أمر يصبح واضحًا بالنظر للوراء بشأن ثنائية الموجة والجسيم. الموضع خاصية نمطية للجسيم، أما الموجات فليس لها موضع دقيق في الفضاء. إذا كان لأحد الكيانات الكمومية وجهان في طبيعته (أو أنه يسلك وكأن له وجهين) هما وجها الجسيم والموجة معًا، فلن يكون مما يفاجئنا أن نجد أنه لا يمكن أبدًا تحديد موضعه بدقة عند إحدى النقاط.

وجد هايزنبرج أن مقدار عدم اليقين في موضع كيان كمومي (عدم اليقين بالنسبة لأين يكون مكانه) له علاقة بمقدار عدم اليقين في حركته

(عدم اليقين بالنسبة لأين يذهب)، وهذه العلاقة هي بحيث كلما زادت الدقة التي يتحدد بها الموضع كان اليقين أقل حول كمية الحركة، والعكس بالعكس. هذان الوجهان اللايقينيان يرتبطان رياضيًا بمعادلة تعرف الآن بعلاقة عدم اليقين لهايزنبرج. النقطة الحاسمة التي تؤخذ بعين الاعتبار هي أن عدم اليقين هذا ليس نتيجة لتخبط بشري أو قصور في التجارب التي نصممها لقياس أشياء مثل الإلكترونات. وإنما عدم اليقين هذا متأصل داخليًا في طبيعة العالم الكمومي. الإلكترون ليس له بالمعنى الحرفي موضع دقيق وكمية حركة دقيقة. الإلكترون المحبوس داخل الذرة مثلًا يكون له موضع في الفضاء محدد بدقة إلى حد ما، ولكن كمية حركته تتغير باستمرار وهو يتحرك هنا وهناك في السحابة الإلكترونية للذرة. الإلكترون الذي يتحرك خلال الفضاء كموجة قد تكون له كمية حركة لها دقة بالغة، ولكنه لا يوجد عند نقطة ما في أي مكان على طول الموجة.

هذا كله مهما كان غريبًا فإنه ليس بنهاية القصة. سنجد أن النوع نفسه من اللايقين الكمومي موجود أيضًا في ثنائيات أخرى من الخواص في العالم الكمومي، إحدى هذه الثنائيات هي الطاقة والوقت. إذا جمعنا معًا علاقة عدم اليقين عند هايزنبرج ونظرية أينشتاين عن النسبية الخاصة (التي تدور حول المكان والزمان) فإن هذا يخبرنا بأنك إذا أخذت حجمًا معينًا مما يبدو أنه فضاء خاوٍ وتابعناه لزمن معين، فلن تستطيع أن تكون متأكدًا من مقدار ما يحويه من طاقة. ليس الأمر أنك «أنت» وحدك الذي لا تستطيع أن تكون متأكدًا، الأمر هو كما في حالة الموضع وكمية الحركة، حيث الطبيعة نفسها لا تعرف ذلك. إذا تابعت الأمر عبر فترة طويلة من الزمن، تستطيع أن تكون متأكدًا من أن الفضاء خاوٍ (أو هو تقريبًا خاوٍ). على أنه كلما كانت فترة زمن المتابعة أقصر، ستقل قدرتك على التأكد من مقدار الطاقة داخل ذلك الحجم. ستجد في الفترة القصيرة زمنيًا القصر الكافي، أن الطاقة تستطيع أن تملأ هذا الحجم، بشرط أن تختفي مرة أخرى خلال الوقت المحدد الذي يتعين حسب علاقة عدم اليقين.

من الممكن أن تتخذ هذه الطاقة شكل فوتونات، تظهر للوجود من لاشيء على الإطلاق، وسرعان ما تختفي ثانية. بل إنها يمكن حتى أن تتخذ

شكل جسيمات كالإلكترونات، بشرط أنها لا تستمر في الوجود إلا للومضة الزمنية البالغة الصغر التي تسمح بها علاقة عدم اليقين. هذه الكائنات ذات الحياة القصيرة تعرف بالجسيمات «التقديرية» (أو الافتراضية)، وتسمى العملية كلها بـ«تراوح الفراغ». الفضاء الخاوي، أو الفراغ، ينظر إليه في هذا النموذج على أنه يرغي ويزبد مضطربًا بالنشاط بالمقياس الكمومي. وعلى وجه الخصوص فإن جسيمًا مشحونًا كالإلكترون يكون غارقًا في بحر من الجسيمات التقديرية والفوتونات، وهذه الجسيمات حتى وهي في زمن حياتها القصير تتفاعل مع الإلكترون. عندما اتُخذت الكهروديناميكا الكمومية (QED) لتفسير وجود هذا البحر من الجسيمات التقديرية، فإنها أعطت تنبؤات توافقت بدقة مع خصائص الجسيمات المشحونة التي قيست في التجارب. الحقيقة هي أن التجارب والنموذج يتوافقان بدرجة من الدقة تصل إلى جزء واحد من عشرة مليارات، أو بنسبة ٠,٠٠٠٠٠٠٠١ في المائة. السبب الوحيد في أن درجة الدقة ليست حتى أفضل من ذلك هو أنه لم تصمم بعد تجارب تصلح لاختبار النموذج بدرجة تكون أكثر دقة. على أن هذا فيه أقصى درجة من دقة الاتفاق بين النظرية والتجربة بالنسبة لأي نموذج علمي تم اختباره فوق الأرض، بل حتى قانون نيوتن للجاذبية لم يصل اختباره إلى هذه الدرجة من الدقة. الكهروديناميكا الكمومية هي بهذا المقياس أنجح نموذج في العلم كله. وهذا التوافق الدقيق يكون صالحًا فحسب بهذه الدرجة عندما يشمل تأثيرات عدم اليقين الكمومي — أي الفراغ المزبد والجسيمات التقديرية. النموذج بأكمله يجتاز الاختبار.

لا يكاد يدهشنا أنه عندما أراد الفيزيائيون إنشاء نموذج للتفاعل المتبادل بين الكواركات — التفاعل القوي — فإنهم اتخذوا الكهروديناميكية الكمومية كقالب صب وحاولوا التوصل إلى نظرية مجال كمومي مشابهة. في هذا النموذج، كمات المجال المسئولة عن نقل التفاعل القوي تسمى الجلونات Gluons أو الغرويات، لأنها تلصق الكواركات معًا مثل الغراء. وكما أن الفوتونات تصاحب الشحنة الكهربائية، فبمثل ذلك تمامًا تصاحب الجلونات نوعًا آخر من الشحنة، تسمى اللون، وإن لم تكن لها علاقة بالألوان بمعنى الكلمة في الحياة اليومية. بينما تأتي الشحنات الكهربائية في نوعين فقط

موجب وسالب، نجد أن شحنة اللون تأتي في ثلاثة أنواع، «أحمر» و«أزرق» و«أخضر». حتى نجعل نموذج التفاعل القوي ناجحًا، نحتاج إلى ثمانية أنواع مختلفة من كمات المجال، في حين أننا في حالة الكهرومغناطيسية نحتاج فقط إلى نوع واحد، هو الفوتون. وبالإضافة لذلك فإن الجلونات بخلاف الفوتون لها كتلة.

نموذج التفاعل القوي المؤسس على الكهروديناميكا الكمومية يسمى الدناميكا اللونية الكمومية (quantum chromo dynamics = QCD)، وذلك لأنه يستخدم بهذه الطريقة أسماء الألوان. هناك صعوبات تنشأ عن العدد الكبير من أنواع كمات المجال وعن حقيقة أنها لها كتلة، ولهذا فإن الديناميكا اللونية الكمومية لا تصنع تنبؤات تتوافق مع نتائج التجارب بنفس الدرجة الدقيقة مثل ما يحدث مع الكهروديناميكا الكمومية، وفي هذا إشارة إلى أن النموذج المعياري ليس بالكلمة الأخيرة في الفيزياء. ولكنه أفضل نموذج لدينا عما يدور داخل أشياء مثل البروتونات والنيوترونات.

كمات المجال مثل الفوتونات والجلونات تسمى معًا بوزونات (تخليدًا لاسم الفيزيائي الهندي سا تندرا بوز)، بينما أنواع الكيانات التي تعودنا أن نفكر فيها كجسيمات، مثل الإلكترونات والكواركات، تعرف بأنها فيرميونات (على اسم الفيزيائي الإيطالي إنريكو فيرمي). وكما أن البوزونات يمكن التفكير فيها باعتبارها كمات مجال، فبمثل ذلك تمامًا يمكن أن نعتبر أن الفرميونات كمات مصاحبة «لمجالات مادة» تملأ كل الفضاء، بما يزيد معه عدم الوضوح في التمييز بين «الجسيمات» و«القوى». إلا أن هناك «فعلًا» اختلافات. الاختلاف الرئيسي بين العائلتين هو أن البوزونات يمكن أن تتخلق من طاقة خالصة بلا حدود — في كل وقت تضيء فيه أحد الأنوار، تتدفق داخل الغرفة مليارات ومليارات الفوتونات التي تخلقت جديدة. إلا أن العدد الكلي للفرميونات في الكون قد بقي العدد نفسه، بقدر ما نعرف، منذ الانفجار الكبير. الطريقة الوحيدة التي نستطيع أن نخلق بها من الطاقة فرميونًا جديدًا، مثل أحد الإلكترونات، هي أن نصنع في الوقت نفسه جسيمًا مضادًا كصورة المرآة (هو في هذه الحالة بعينها البوزيترون). الجسيم صورة المرآة هذا له خواص كمومية مضادة

(بما يشمل في هذه الحالة وجود شحنة كهربائية موجبة بدلًا من الشحنة الكهربائية السالبة)، ومن ثم فإن كلا الفرميونين الاثنين يلغي أحدهما الآخر من حيث إحصاء عدد الفرميونات، ذلك أن أحدهما سالب والآخر موجب وحاصل جمعهما يكون لا شيء. لدينا فيما بعد المزيد مما سنقوله عن المادة المضادة.

حتى الآن قد عيّنا ثلاثة فرميونات مختلفة — الإلكترون، والكوارك العلوي، والكوارك السفلي. قد عينا كذلك ثلاثة أنواع مختلفة من التفاعلات — الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والتفاعل القوي. إلا أنه لا يزال هناك فرميون واحد آخر وتفاعل واحد آخر نضيفه للقائمة. هذه الإضافة إلى النموذج المعياري أمر مطلوب لتفسير ظاهرة لوحظت لأول مرة في القرن التاسع عشر إلا أنها لم توصف وصفًا رياضيًّا مُرضيًا إلا في ستينيات القرن العشرين. وهي تسمى اضمحلال بيتا، وتشمل عمليات تُقذف فيها إلكترونات (كانت تسمى عادة أشعة بيتا) من الذرات. استغرق الفيزيائيون زمنًا بالغ الطول لفهم ماذا يجري هنا، وذلك لأنه بدا أن طبيعة هذه الظاهرة تتغير كلما زاد الفيزيائيون عمقًا في سبر بنية الذرة.

ليس مما يثير الدهشة أن تستطيع «الذرات» قذف إلكترونات، لأن الذرات كلها تحوي إلكترونات. إلا أن التجارب بينت أن الإلكترونات المتضمنة في اضمحلال بيتا تأتي بالفعل من «نوى» الذرات، والنوى لا تحوي إلكترونات، وإنما تحوي فقط نيوترونات وبروتونات. اكتشف القائمون بالتجارب بعدها أنه يحدث في اضمحلال بيتا أن أحد النيوترونات يلفظ إلكترونًا ويتحول هو نفسه إلى بروتون. لا يحدث تغير في إجمالي الشحنة الكهربائية في الكون لأن الموجب والسالب يلغي أحدهما الآخر، إلا أنه كما يبدو قد تخلق فرميونًا جديدًا. وبالإضافة إلى ذلك، حتى يحدث توازن مع الطاقة وكمية الحركة للإلكترون المقذوف، يبدو أنه لا بد أن يكون هناك جسيم غير مرئي ينطلق بعيدًا من النيوترون المضمحل في الاتجاه المضاد. تم التوصل إلى حل لكلا الأحجيتين في أوائل ثلاثينيات القرن العشرين باقتراح أنه عندما يتم في اضمحلال بيتا صنع أحد الإلكترونات من الطاقة، فإنه يتم أيضًا إنتاج فرميون زميل يسمى نيوترينو (أو لو تحدثنا على وجه الدقة فإنه لإحداث

توازن في عدد الفرميونات يتم إنتاج «مضاد» نيوترينو). جسيمات النيوترينو ليس لها شحنة ولها فقط كتلة بالغة الضآلة، ولهذا فإن إثبات هذا التخمين بالتجربة (وهو تخمين تم بواسطة الفيزيائي النمساوي ولفجانج باول) استغرق زمنًا وصل إلى خمسينيات القرن العشرين، إلا أنه تم إثباته بالفعل. ولكن حتى بعد ذلك كان واضحًا أنه لا الإلكترون ولا النيوترينو يوجد أي منهما «داخل» النيوترون، يحدث في اضمحلال بيتا أن يعاد تنظيم البنية الداخلية للنيوترون لتنطلق طاقة في شكل هذين الجسيمين الاثنين، ويتحول النيوترون إلى بروتون.

تم الآن فهم ذلك بلغة من الكواركات. يحوي النيوترون كواركين اثنين من النوع السفلي وكواركا واحدًا علويًّا، بينما يحوي البروتون كواركين علويين وكواركًا واحدًا سفليًّا. الكوارك السفلي لديه شحنة كهربائية سالبة مقدارها ثلث مقدار شحنة الإلكترون، والكوارك العلوي لديه شحنة موجبة مقدارها ٢/٣ شحنة الإلكترون. ومن ثم عندما يتحول كوارك سفلي إلى كوارك علوي، فإنه يجب أن تنطلق بعيدًا وحدة شحنة سالبة، وغياب هذه الشحنة السالبة — في مثل رائع لأن العلامتين السلبيتين تصنعان علامة موجبة — يخلف وراءه توازنًا عامًّا من وحدة شحنة موجبة واحدة، هكذا يغدو النيوترون بروتونًا. الشحنة السالبة تُنقل بعيدًا بواسطة إلكترون، كما أن بعض الطاقة الفائضة تنقل بعيدًا بواسطة مضاد نيوترينو. هكذا فإن كلًّا من العدد الكلي للفرميونات والمقدار الكلي للشحنة الكهربائية في الكون يبقى كما هو. بما أن كتلة الكوارك السفلي أكبر من كتلة الكوارك العلوي، والكتلة تساوي الطاقة، فإن كل شيء يكون في حالة توازن متقن. هذا طالما سيوجد، أو أنه يوجد هناك نوع جديد من التفاعل يجري ما بين الجسيمات المتضمنة هنا.

أصبح هذا النوع «الجديد» من التفاعل يعرف بأنه التفاعل الضعيف (لأنه ليس قويًّا مثل التفاعل القوي)، وقد تم تطوره ليوفر لنا تبصرًا نافذًا في العمليات التي تشمل اضمحلال النشاط الإشعاعي (عندما تنشق النوى منفصلة) والاندماج النووي (عندما تنضم النوى معًا لتصنع نوى أكثر تعقيدًا، كما يحدث داخل النجوم). حتى يتوافق التفاعل الضعيف مع

معطيات التجارب، فإنه يتطلب وجود ثلاثة أنواع من البوزونات: بوزون دابليو+ (W^+)، وبوزون دابليو− (W^-) وكل منهما تحمل الوحدة المناسبة من الشحنة الكهربائية، وبوزون زد (Z) وهو متعادل كهربائيًّا. هذا أسهل في التعامل رياضيًّا من الديناميكا اللونية الكمومية، ولكنه أكثر صعوبة من الكهروديناميكا الكمومية. على الرغم من أن نظرية التفاعل الضعيف تصف الآن ما هو أكثر كثيرًا من اضمحلال بيتا البسيط، فإنه لتكملة تلك القصة فإن الصورة الجديدة لاضمحلال بيتا تصور كواركًا سفليًّا يبعث طاقة في شكل بوزون دابليو− (W^-) ليحول نفسه إلى كوارك علوي، ثم بعد زمن قصير جدًّا تحول طاقة البوزون دابليو− (W^-) نفسها إلى كتلة في شكل إلكترون ومضاد نيوترينو.

جسيمات دابليو وزد لها كتلة مثلها مثل الجلونات، ويمكننا التنبؤ بكتلتها من النموذج. من أعظم انتصارات النموذج المعياري أنه عندما كُشف عن هذه الجسيمات في أوائل ثمانينيات القرن العشرين في معمل (سيرن) بالقرب من جنيف، وُجد أن لها بالضبط الكتل التي تنبأ بها النموذج. على أنه بحلول ذلك الوقت أصبح النموذج المعياري أكثر تعقدًا من بعض النواحي، وإن كان قد غدا أبسط في نواحٍ أخرى.

جوهر النموذج المعياري أنه يصف العالم الفيزيائي المألوف بلغة هي فحسب من أربعة جسيمات[4] وأربعة تفاعلات. الجسيمات الأربعة هي الإلكترون والنيوترينو (التي تعرف معًا باللبتونات)[5] والكواركات العلوية والسفلية. التفاعلات الأربعة هي الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والتفاعلات النووية الضعيفة والقوية. هذا هو كل ما يحتاجه الفيزيائيون لتفسير كل الظواهر الطبيعية على الأرض، وكذلك أيضًا كل ما تفعله الشمس والنجوم التي نستطيع رؤيتها في السماء. إلا أنه ثبت في النهاية أن هذا ليس كافيًا لتفسير كل ما يلاحظ في الظروف غير الطبيعية للعمليات ذات الطاقة العالية التي تجري في معجلات الجسيمات، مما أدهش الفيزيائيين.

---

[4] يعني بذلك بالطبع أربعة «أنواع» من الجسيمات، وسيكون من الحذلقة أن نوضح ذلك في كل مرة. (المؤلف)

[5] اللبتونات: اللبتون جسيم خفيف يشبه الإلكترون إلى حد ما. هناك ٦ لبتونات هي الإلكترون، والميون والتاوون، وثلاثة جسيمات مصاحبة من النيوترينو. (المترجم)

يبدو حقًّا أن هناك أربعة تفاعلات لا غير تعمل في الكون. المفاجأة هي أن عالم الجسيمات لا يقتصر على أن يتضاعف بمثلين عند الطاقات العالية وإنما يتضاعف بثلاثة أمثال. عندما تتاح الطاقة بمقدار كافٍ، يمكن إنتاج كمٍّ هائل من نظائر قصيرة العمر تناظر كل الجسيمات الأربعة الأساسية، وذلك على مدى من جيلين آخرين. هناك أولًا نظير ثقيل للإلكترون يسمى الميون ويصاحبه نيوترينو الميون، وهناك كذلك كواركان أثقل اسمهما السحر والغريب، ثم هناك «إلكترون» أثقل يسمى التاو وما يخصه من نيوترينو التاو، ثم كواركان ثقيلان جدًّا سميا القمة والقاع. أثبتت التجارب البارعة في (سيرن) بما يتجاوز أي شك أن هذه هي نهاية القصة؛ مهما كان كبر مقدار الطاقة التي نضعها في اصطدام الجسيمات لن يحدث قط أن نصنع جيلًا رابعًا من الجسيمات.

عندما يتم إنتاج هذه الجسيمات الثقيلة في المعجلات فإنها تضمحل في التو، وتتحلل في النهاية إلى الجسيمات الجيل الأول المألوفة. ومن ثم فإنها في عالمنا الحالي لها فحسب أهمية أكاديمية. ولكنها في الظروف ذات الطاقة النشطة في الكون المبكر يمكن أن يتم إنتاجها بوفرة، وسيكون لها تأثير في طريقة تطور الكون. لا يعرف أحد سببًا لأن يكون الكون بالغ الإسراف إلى حد أن يتيح وجود هذه النسخ الأثقل من المجموعة الأساسية للجسيمات الأربعة الأولية. هذه مجرد علامة أخرى على أن النموذج المعياري ليس هو الكلمة الأخيرة في الفيزياء.

على أنه لا داعي لليأس. فحتى عندما كان النموذج المعياري يدمج هذه الإضافة غير المرحب بها في حديقة حيوانات الجسيمات، فإنه كان يمحو أحد التفاعلات من مخططه ويوضح الطريق لإزالة تفاعلات أخرى.

بصرف النظر عن كتلة وشحنة الجسيمات، فإن المعادلات التي تصف بوزونات دابليو وزد كجسيمات مصاحبة للمجال الضعيف تشابه تمامًا المعادلات التي تصف الفوتون كجسيم مصاحب للمجال الكهرومغناطيسي. الشحنة الكهربائية قد تم وصفها بالفعل بواسطة معادلات ماكسويل عن الكهرومغناطيسية. أدرك الفيزيائيون في ستينيات القرن العشرين أنهم إذا أمكنهم العثور على طريقة لإضافة كتلة للفتونات فسيكون لديهم

مجموعة واحدة من المعادلات تصف معًا المجال الكهرومغناطيسي والمجال الضعيف — سيكونون هكذا قد وحدوا المجالين في تفاعل واحد هو «الكهروضعيف». تطلّب سعي المنظرين لتوحيد هذين التفاعلين أن ينطلقوا خلال العديد من المسالك المسدودة حتى يقعوا على نموذج مُرضٍ — وكلمة «مُرضٍ»، كما هو الحال دائمًا، تعني صنع تنبؤات تتوافق مع نتائج التجارب. النموذج الذي توصل إليه المنظرون، وهو الآن مكون أساسي للنموذج المعياري، قد نشأ بالفعل عن محاولات أجراها الفيزيائي البريطاني بيتر هيجز وهو يعمل في (سيرن) للعثور على نموذج للتفاعل القوي. كما هو الحال دائمًا، كان هناك أفراد كثيرون شاركوا في إنشاء النموذج، إلا أن هيجز هو الذي أعطى اسمه لهذه الظاهرة.

الفكرة التي توصل إليها هيجز هي أن الجسيمات كلها في جوهرها الداخلي تكون بلا كتلة، ولكن الكون كله مليء بمجال «جديد» لم يسبق أن خطر على بال، ويتفاعل مع الجسيمات ليمنحها كتلة. يعرف هذا المجال الآن بأنه مجال هيجز. إحدى الطرائق السهلة لتصور ما يجري هي أن نتخيل طريقة تغير سلوك مركبة فضاء لو كان الفضاء يمتلئ فعلًا بغاز لا مرئي مثل الهواء. في الفضاء الخاوي، عندما نستخدم المحركات الصاروخية لمجس فضاء لتوفر دفعًا ثابتًا للمجس، فإنه سيتسارع بمعدل ثابت طالما يستمر المحرك في الاشتعال. ولكن لو كان المجس يتحرك خلال بحر من الغاز يتسق اتساقًا كاملًا، فإن المحركات عندما تنطلق مشتعلة بنفس المعدل الثابت من السرعة فإنه لن يتسارع بمعدل السرعة نفسها بسبب المقاومة التي يسببها الغاز. سيكون التأثير مماثلًا لما سيحدث لو كان المجس أثقل (أكثر كتلة) مما هو عليه حقًا. وبطريقة مماثلة فإن الجسيمات التي لا كتلة لها التي تتحرك خلال مجال هيجز تلقى «مقاومة» يبدو أنها تعطيها كتلة، بحيث يعتمد مقدار الكتلة المضبوط على طبيعة الجسيم المفرد وقوة التأثير الذي يحس به من مجال هيجز.

يعطي هذا النموذج تنبؤات حول كتل جسيمات دابليو وزد، وفي ١٩٨٤ وصلت التجارب في (سيرن) إلى مقادير من الطاقة يمكن عندها إنتاج جسيمات بالكتلة المطلوبة بما يتفق مع معادلة ط = ك س٢. وُجدت

الجسيمات وهي بالضبط كما سبق التنبؤ به ولها بالضبط الكتل المناسبة. يُعد هذا أحد النجاحات العظيمة للنموذج المعياري. إلا أن النموذج يصنع أيضًا تنبؤًا آخر مهمًا لم يختبر بعد.

حسب هذا النموذج، فإن مجال هيجز، مثل كل المجالات، لا بد أن يكون له جسيم يصاحبه — وهو بوزون هيجز. هذا الجسيم أثقل كثيرًا من أن يتم إنتاجه في أي تجربة نُفذت حتى الآن على الأرض. إلا أن هناك معجل جديد اسمه «معجل اصطدام الهادرون[٦] الكبير» The Large Hadron Collider, LHC خطط له أن يبدأ عمله في ٢٠٠٧ في سيرن.[٧] يمكننا إدراك بعض فكرة عن الجهد المطلوب لسبر طبيعة الكون على هذا المستوى وذلك عن طريق ما يعطيه لنا حجم هذا المعجل وتكلفته. معجل LHC مدفون تحت الأرض على عمق مائة متر في نفق دائري محيطه ٢٧ كيلومترًا، ومحفور في صخر صلب، وسيأخذ المعجل حزمًا من البروتونات سبق تعجيلها لتصل إلى طاقة عالية في المعجلات الموجودة من قبل في (سيرن) وترسل هذه الحزم في طريقين مضادين حول الحلقة لتصطدم اصطدامًا مباشرًا بطاقة اصطدام تبلغ ١٤ تيرا إلكترون فولت (Tev، الوحدة من Tev هي ألف مليار أو ترليون إلكترون فولت). يماثل هذا تقريبًا طاقة الحركة (الطاقة الحركية) لبعوضة طائرة — ولكنها محبوسة في حيز حجمه أصغر بألف مليون مرة من البعوضة. هذه طاقة كافية لصنع ألف بروتون تنتج من الطاقة الخالصة. معجل LHC سيتمكن أيضًا من إحداث اصطدام لحزم من نوى الرصاص إحداها بالأخرى عند طاقات تزيد قليلًا عن ١٠٠٠ تيرا إلكترون فولت. سيستخدم المعجل ١٢٩٦ من المغناطيسات فائقة التعجيل و٢٥٠٠ مغناطيس آخر لتوجيه وتعجيل حزم الجسيمات، ويصل في تكلفته إلى ما يقرب من ٥ مليارات يورو (أقل بقليل من ٣٫٥ مليار جنيه إسترليني أو ٦ مليارات دولار). هذا هو الثمن الذي يجب أن ندفعه إذا كنا نريد أن نختبر

---

[٦] الهادرون: جسيم مادة تحت ذري يحس بالقوة القوية، والهادرونات تشمل الباريونات والميزونات وكلها مصنوعة من الكواركات. وكمثل فإن البروتون والنيوترون باريونات، في حين أن الميزون يتكون من كوارك ومضاد كوارك، الميزونات تربط البروتونات والنيوترونات. (المترجم)

[٧] حتى وقت ترجمة هذا الكتاب ٢٠٠٩ أجريت تجربة واحدة بهذا المعجل بعد مصاعب فنية عطلت التجربة في أول الأمر. للآن لم يتم إعلان نتائج التجربة وتفسيرها. (المترجم)

النموذج المعياري. إذا كان النموذج المعياري صحيحًا حقًّا، فإن معجل LHC ينبغي أن يبدأ في إنتاج جسيمات هيجز سريعًا بعد أن يتم تشغيله بالكامل. إذا وجد بوزون هيجز حسب التنبؤ به، فسيؤدي هذا إلى أن يغدو النموذج المعياري موثوقًا به إلى حد بعيد، وسيكون من المؤكد أن ينال بيتر هيجز جائزة نوبل؛ إذا لم يتم اكتشافه بالكتلة المتنبأ بها، فسيوضح هذا الطريق نحو نموذج أفضل للعالم تحت الذري.

هكذا فإن النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات، النموذج الذي نعتقد أننا «نعرفه»، يتضمن الآن أربعة جسيمات أساسية موجودة في زوجين (إلكترون، وبروتون وكواركين علوي وسفلي)، وهي جسيمات تتكرر (لأسباب غير معروفة) في جيلين اثنين آخرين. وهو يتضمن أيضًا ثلاثة تفاعلات (الجاذبية، والتفاعل الكهروضعيف، والتفاعل القوي، يضاف لها مجال هيجز). هذه الحزمة تفسر كل شيء فوق الأرض، كما تفسر طريقة عمل النجوم. إلا أن الفيزيائيين يريدون فعل المزيد، فهم يريدون تفسير أسئلة مثل من أين أتى الكون، وكيف وصلت النجوم والكواكب إلى الوجود. كما سوف نرى في الفصل الثالث، هناك أدلة قوية على أن الكون بدأ بكرة نار ساخنة تتضمن طاقات أعظم كثيرًا من أي شيء يمكن التوصل إليه في تجاربنا. ومن ثم، فإنه حتى نحاول أن نفهم من أين أتى العالم، ثم في النهاية من أين أتينا «نحن»، سيكون على المنظرين أن يذهبوا إلى مدى يتجاوز النموذج المعياري للأمور التي «نعتقد» أننا نعرفها.

الفصل الثاني

هل هناك نظرية لكل شيء؟

أدى نجاح توحيد القوة «الكهروضعيفة» إلى تشجيع الفيزيائيين لمحاولة توحيد التفاعل الكهروضعيف مع التفاعل القوي، وأن يحلموا بدمج الجاذبية لاحقًا مع باقي الحزمة. النماذج التي تحاول أن تصف التفاعل الكهروضعيف والتفاعل القوي معًا في حزمة رياضية واحدة تسمى عادة النظريات الموحدة الكبرى Grand Unified Theories = GUTS؛ النظرية التي تضم أيضًا الجاذبية ستكون نظرية كل شيء Theory Of Everything = TOE. في كلتا الحالتين، ومع الوضع الحالي لمعرفتنا، قد يكون من الأفضل أن نستخدم بدلًا من كلمة «نظرية» كلمة «فرض» أو «نموذج»، إلا أن الاختصارات لن تكون بالدرجة الملائمة نفسها. وما نحاول نحن الفيزيائيين عمله هو فهم القوانين التي تحكم تطور الكون بطريقة مماثلة للطريقة التي يحاول بها كتاب السير أو المؤرخون فهم الدوافع الكامنة وراء قرار شخصية كبرى مثل يوليوس قيصر، فما نعرفه هو نتائج هذه القرارات، وبتحليلها نستطيع استنتاج الدوافع. وبالمثل نحن نعرف نتائج عمل القوانين الفيزيائية التي تحكم الكون، وبتحليلها نستطيع استنتاج تلك القوانين.

وكما هو الحال مع التاريخ، نستطيع الوصول إلى رؤى مختلفة عن طريق النظر إلى الأحداث من زوايا مختلفة. فعلى سبيل المثال، على الرغم من أننا طرحنا فكرة المجال الضعيف بلغة من اضمحلال النيوترون، فإن هناك جانبًا آخر لهذا النوع من التفاعل يساعد في إظهار طريقة بناء النظريات الموحدة الكبرى. بدلًا من أن يلفظ أحد النيوترونات إلكترونًا ومضاد نيوترينو ليحول نفسه إلى بروتون، يستطيع نيوترينو يأتي من الخارج أن يتفاعل

مع النيوترون عن طريق التفاعل الضعيف (أو إذا تحدثنا بدقة فإنه يتفاعل مع الكوارك السفلي داخل النيوترون). يتحول النيوترينو في هذه العملية إلى إلكترون (والنيوترون إلى بروتون). وبكلمات أخرى يستطيع التفاعل الضعيف أن يغير أحد أنواع اللبتونات إلى نوع آخر. في نموذج الديناميكا اللونية الكمومية، عندما تتحرك الجلونات بين الكواركات فإنها تحمل معها شحنة لون، وبهذا فإنها تستطيع أن تغير لون الكواركات (أو ينبغي أن نقول إنها تغير شحنة اللون). وبكلمات أخرى يستطيع التفاعل القوي أن يغير أحد أنواع الكواركات إلى نوع آخر، وهذه حيلة يفعلها أيضًا التفاعل الضعيف ولكن بطريقة مختلفة عندما يغير كواركًا سفليًا إلى كوارك علوي داخل أحد النيوترونات. وهكذا فإنه يمكن تغيير أحد أنواع الجسيمات (أو أحد أنواع الفرميونات) إلى الآخر. كان السؤال الذي أخذ الفيزيائيون يوجهونه لأنفسهم هو هل من الممكن العثور على نموذج يمكن فيه تغيير نوع من حامل لشحنة (نوع من بوزون) لآخر، وأدت محاولاتهم للإجابة عن هذا السؤال إلى نشأة النظريات الموحدة الكبرى في أعقاب نجاح توحيد القوى الكهروضعيفة ونموذج الديناميكا اللونية الكمومية.

على أننا في الحقيقة لا يزال علينا أن نتحدث حول مجموعة منوعة مما هو ممكن من النظريات الموحدة الكبرى، بدلًا من نظرية واحدة حاسمة، وهذه الحقيقة تبين أن هذا البحث لم يكتمل بعد. على أن كل هذه النماذج (كما ينبغي أن نسميها) تتضمن مفتاحًا مهمًا واحدًا: البوزونات التي تستطيع أن تغير «نوعًا» من الشحنة إلى «نوع» شحنة آخر ستكون قادرة على أن تحول اللبتونات إلى كواركات، والعكس بالعكس. لم يكن في هذا أي مفاجأة كبيرة، لأنه مع اكتشاف أن الكواركات واللبتونات تأتي في ثلاثة أجيال، في كل جيل منها زوج من اللبتونات وزوج من الكواركات، فإن هذا الاكتشاف كان فيه ما يشير بالفعل إلى وجود صلة أساسية بين نوعي الفرميونات. على أنه يعني أنه كما أن النيوترونات تستطيع أن تتفاعل مع بوزونات المجال الضعيف لتضمحل إلى بروتونات، فإنه بمثل ذلك تمامًا ينبغي أن تكون البروتونات قادرة على التفاعل مع بوزونات المجال الموحد لتحول نفسها إلى لبتونات. وبكلمات أخرى فإنه حتى البروتونات ينبغي

أن تضمحل، عندما تتحول الكواركات داخلها إلى لبتونات. هذا تنبؤ حازم وقابل للاختبار لكل هذه العائلة بأسرها من النظريات الموحدة الكبرى.

البوزونات المفترضة للمجال الموحد سميت جسيمات إكس X وواي Y. لم يتم قط الكشف عن هذه الجسيمات، إلا أن هذا ليس فيه ما يبعث على الدهشة لأن النماذج تخبرنا بأن هذه الجسيمات لا بد أن يكون لها كتل هائلة، بمقاييس الجسيمات — وتكون عادة بمليون مليار مرة، أي ١٠^١٥ ضعف كتلة البروتون، بحيث إن صنعها سيتطلب معجلًا له القدرة على أن يصل إلى طاقات قدرها يزيد بألف مليار ١٠^١٢ ضعف عن الطاقات التي عثر عندها على جسيمات دابليو وجسيمات زد.[١] الأنواع المختلفة من جسيمات إكس وواي يكون لها أيضًا شحنات كهربائية تساوي موجب أو سالب ٣/٤ من الشحنة على أحد الإلكترونات، أو موجب أو سالب ١/٣ الشحنة على أحد الإلكترونات، كما أنها تأتي أيضًا بشحنات لون مختلفة. حاليًا لا يمكن للبروتون أن يضمحل إلا إذا استطاع أن «يقترض» قدرًا كافيًا من الطاقة من عدم اليقين الكمومي، في شكل تراوح للفراغ، وذلك حتى يصنع بوزونا كهذا للحظة وجيزة.

إذا استطاع البروتون أن يفعل ذلك، فإن أحد أشكال اضمحلال البروتون سيكون مساره كالتالي: يقوم كوارك علوي داخل البروتون (بشحنة ٢/٣) بتحويل نفسه إلى مضاد كوارك علوي (بشحنة –٢/٣) ويطلق بوزون إكس (حتى وإن كانت كتلة البوزون أكبر كثيرًا من كتلة الكوارك!)، بوزون إكس (شحنة ٣/٤) سيتفاعل أيضًا مع كوارك سفلي مجاور، ليحوله إلى بوزيترون.[٢] سيخلف هذا مضاد الكوارك العلوي متزاملًا مع الكوارك الوحيد الباقي من البروتون، كوارك علوي. الكوارك العلوي هو ونظيره من المادة المضادة، مضاد الكوارك العلوي، سيشكلان حالة من ارتباط مؤقت (يسمى

[١] الوحدات التي يستخدمها علماء فيزياء الجسيمات لقياس الكتلة تسمى إلكترون فولت (ev)، كتلة البروتون هي تقريبًا جيجا (مليار) من الإلكترون فولت (1 Gev). وهكذا فإن كتلة جسيم إكس تكون تقريبا ١٠^١٥ جيجا إلكترون فولت. الحقيقة أن الفيزيائيين يقيسون الطاقة والكتلة معًا بوحدات الإلكترون فولت، حيث إن أينشتاين قد اكتشف أن الكتلة والطاقة تساوي كل منهما الأخرى. عامل c^2 (س^٢) الذى يظهر في معادلة أينشتاين البالغة الشهرة يتم تفهمه وتقبله هكذا. (المؤلف)

[٢] البوزيترون: مضاد الإلكترون وله نفس كتلته ولكن شحنته موجبة. (المترجم)

البيون)،[٣] إلا أنه سرعان ما يبيد أحدهما الآخر، ليتخلف عن ذلك بوزيترون وتفجر من إشعاع كهرومغناطيسي نشط (فوتونات) ويكون هذا هو الأثر الوحيد من البروتون الأصلي. على أن كل شيء يعتمد على اقتراض الطاقة من الفراغ لصنع بوزون إكس افتراضي لزمن يكفي لأن يحدث التفاعل. بوزون إكس الافتراضي يظل موجودًا لزمن بالغ الصغر بحيث إنه لا يستطيع أن ينتقل إلى أبعد من ١٠-٢٩ سنتيمترًا يختفي بعدها، ومن ثم فإنه حتى يمكن أن يُجعل تأثيره محسوسًا، فلا بد أن يقترب كواركان أحدهما من الآخر لمسافة هي على الأقل ١٠-٢٩ سنتيمترًا.

تخبرنا النماذج عن مدى احتمال أن يحدث ذلك. وفقًا للحسابات التي تتأسس على أبسط صور هذه النماذج، فإن احتمال أن مقدارًا كافيًا من الطاقة سيظهر من لاشيء مطلقًا، أي كتراوح للفراغ داخل بروتون مفرد؛ لهو احتمال بالغ الصغر، بحيث لو كان لدينا صندوق مليء بالبروتونات وانتظرنا لما يزيد تقريبًا عن ١٠٣٠ سنة (أي ما هو تقريبًا ١٠٠ مليار ضعف عمر الكون) فسنجد أنه سيضمحل فقط نصف هذه البروتونات. لا يهم هنا ما يكونه عدد البروتونات التي بدأنا بها. إذا بدأنا بألف بروتون، فإنه بعد مرور كل هذا الزمن سنجد أن خمسمائة منها قد اضمحلت؛ وإذا بدأنا بعدد من مليار بروتون فإنه بعد مرور كل هذا الزمن سنجد أن نصف مليار منها قد اضمحلت. هذا القياس الزمني يُعرف لأسباب واضحة، بأنه عمر النصف للبروتون، وهناك أعمار نصف مختلفة مميزة لكل هذه العمليات الاضمحلالية. (مثال ذلك أن عمر النصف لنيوترون خارج النواة هو ١٠,٥ دقيقة — أما داخل النواة فالأمر يختلف). من الواضح بالنسبة للبروتون المفرد أن احتمال أن يحدث اضمحلال كهذا أثناء حياة إنسان هو احتمال صغير إلى حد التلاشي. إلا أن هناك الكثير من البروتونات في الكون (يحوي جسمك مثلًا ما يقرب من ١٠٢٩ من البروتونات). إذا راقبت بروتونات كثيرة لزمن قصير نوعًا، ينبغي أن ترى أن هناك على الأقل عددًا صغيرًا منها يضمحل. إذا راقبت كتلة من المادة تحوي ما يقرب من عشرة

---

[٣] البيون: هو ميزون باي أكثر الميزونات شيوعًا. والميزون جسيم يحس بالقوة القوية أي أنه أحد الهادرونات. يتكون الميزون من كوارك ومضاد كوارك، والميزونات تربط البروتونات والنيوترونات. (المترجم)

أطنان من خامة لها عمر نصف $١٠^{٣٠}$ سنة ينبغي أن ترى ما يقرب من خمسة اضمحلالات بكل سنة. يصدق هذا على أي شيء — الماء، والحديد، والمقانق (السجق)، وأي شيء يحوي بروتونات. أجرى العلماء تجارب من هذا النوع (وهم غالبًا يستخدمون خزانات ماء كبيرة، حيث إنه يسهل تداوله)، باحثين عن البوزيترونات التي تنتج عن هذا الاضمحلال وتشي به. حتى الآن لم يتمكن العلماء من رؤية أي أثر لاضمحلال بروتون، وهذا يخبرنا بأن عمر النصف للبروتون هو على الأقل ٥ × $١٠^{٣٢}$ من السنين (أي خمسة يعقبها اثنان وثلاثون صفرًا من السنوات). هذا زمن أطول من عمر النصف الذي تنبأت به النظريات الموحدة الكبرى الأصلية. ولكن هذه الأنباء في الواقع أنباء طيبة، لأن الجهود لتحسين هذه النماذج لأسباب أخرى قد أدت إلى تغيرات في الحسابات تتضمن عمر نصف أطول للبروتون.

أحد هذه التحسينات له علاقة بالطريقة التي يبدو بها أن شدة إحدى القوى تتغير عندما نقترب من أحد الجسيمات. عندما تحدثنا من قبل عن شدة قوى التفاعل، كنا نشير إلى شدة القوة التي تقاس على مسافة بعد لها قدرها من الجسيم المشارك في الأمر، وذلك بالمقارنة بحجم الجسيم. حيث إن «المسافة التي لها قدرها» بالنسبة للإلكترون لا تزال ضئيلة بالمقاييس البشرية، فإن هذا فيه أول تقريب جيد. إلا أن سحابة الجسيمات الافتراضية المشحونة التي تحيط بأحد الإلكترونات تحجب وتحمي جزئيًّا شحنته الداخلية المكشوفة من العالم الخارجي. هذه الحماية تجعل التفاعل الكهرومغناطيسي يبدو من على بعد أضعف مما لو أمكنك أن تقترب حقًّا من أحد الإلكترونات، ومن ثم فإنه بالنسبة للإلكترون أو أي جسيم آخر مشحون كهربائيًّا، نجد أنه عند المقاييس الصغيرة جدًّا يبدو أن قوة التفاعل الكهرومغناطيسي تصبح أقوى عندما نقترب من الجسيم. ومن الجانب الآخر، فإن طريقة تفاعل الكواركات والجلونات مع الجسيمات الافتراضية تجعل التفاعل القوي يصبح أضعف عندما نقترب من جسيم يحس بالتفاعل القوي. التعامل مع التفاعل الكهروضعيف أكثر تعقدًا إلى حد قليل عما في حالة الكهرومغناطيسية، بسبب تأثير كتل جسيمات دابليو وزد. عندما تؤخذ هذه في الحسبان، فإن القوة «العارية» للتفاعل تكون شدتها ما بين

شدة التفاعل القوي وشدة التفاعل الكهرومغناطيسي، وتصبح أيضًا أضعف عند المسافات الأقرب.

لو كان النموذج المعياري متقنًا إلى حد الكمال، فسيبدو أن كل هذه التفاعلات لها نفس الشدة عند مقياس مسافة معين. كما سبق ذكره فإن سبر المسافات الأقصر يتطلب تعجيل حزم الجسيمات إلى طاقات أعلى، وهذا يساوي القول إنه عند طاقة معينة ينبغي أن يُظهر كل من التفاعل القوي، والضعيف، والكهرومغناطيسي نفس شدة القوة. المسافة المتضمنة هنا تكون حقًّا ضئيلة لأقصى حد — ما يقرب من $١٠^{-٢٩}$ سنتيمترًا. يكاد يكون من المستحيل أن تستطيع التفكير فيما يعنيه رقم بهذه الضآلة، ولكن لو أن نواة ذرة نمطية مطت لتصبح كرة عرضها كيلومترًا، فإن الكيان الذي كان قد بدأ بعرض $١٠^{-٢٩}$ من السنتيمترات سيصبح بحجم نواة. الطاقة المرادفة لذلك تقرب من $١٠^{١٥}$ مثل لطاقة كتلة البروتون، وهذا يتجاوز كثيرًا أي مستويات يمكن أن نأمل بأي حال التوصل إليها في تجاربنا. إلا أنه ليس من باب الصدفة أن هذه الطاقة تناظر كتل بوزونات إكس وواي. هناك طريقة أخرى للتفكير في هذا كله بلغة من الطاقة المتاحة لصنع جسيمات جديدة. إذا كان هناك طاقة كافية لصنع بوزونات إكس وواي، فسيكون من المؤكد عندها وجود طاقة كافية لأن تصنع أيضًا جسيمات دابليو وزد، وكل الجلونات التي يمكن بأي حال أن نرغب فيها. وبهذا فإن كل الجسيمات الافتراضية يُرتقى بها إلى الواقع — فهي لا تعود بعد افتراضية وإنما ستستخدم الطاقة المتاحة لتصبح جسيمات واقعية، ليس عليها بعد أن تشكل سحابة محكمة حول جسيمات كالإلكترونات، وتستطيع هكذا أن تتجول لحسابها الخاص. هكذا يختفي التأثير الحاجب الحامي، ويكون كل ما نراه هو شحنات عارية (شحنات كهربائية، وشحنات لون، وهلم جرًّا).

هناك وجه ضعف في النموذج المعياري وامتداداته التي وصفت حتى الآن وهو أنه على الرغم من أن النموذج يتنبأ بالطاقات التي تحدث عندها كل هذه العمليات، فإنه لا يتنبأ بالضبط بالطاقة نفسها لتوحيد التفاعلات الثلاثة كلها. فهو يقول إن التفاعل الكهرومغناطيسي والضعيف يندمجان في التفاعل الكهروضعيف عند إحدى الطاقات، وإن التفاعل الكهرومغناطيسي

والتفاعل القوي يندمجان عند طاقة تختلف قليلًا، وإن التفاعل الضعيف والقوي يندمجان عند طاقة ثالثة تختلف قليلًا. ولكن هذه التوحيدات الثلاث يمكن شدها معًا لتلتقي عند نقطة واحدة بواسطة عائلة من النظريات الموحدة الكبرى (أو النماذج، تعرف باسم السمترية الفائقة[4] أو سوسي Supersymmetry or SUSY.

قد التقينا من قبل بسمتريات يتغير فيها أحد أنواع الفرميونات إلى نوع آخر من الفرميون، ويتغير أحد أنواع البوزونات إلى نوع آخر من البوزون. في منتصف سبعينيات القرن العشرين طرح جوليان وايس في ألمانيا، وبرونو زومينو في كاليفورنيا، اقتراحًا بأن الفرميونات والبوزونات قد تكون على علاقة أحدها بالآخر بواسطة نوع آخر من عملية سمترية — هي السمترية الفائقة (السوبر سمترية) — التي تستطيع أن تحول الفروميونات إلى بوزونات أو العكس بالعكس.

هذا أمر يبدو سخيفًا مضحكًا بالنسبة للحس المشترك للحياة اليومية. كيف يمكن للمادة أن تتحول إلى قوة، أو أن تتحول القوة إلى مادة؟ إلا أن عالم الكمومية كثيرًا ما يتعارض مع الحس المشترك للحياة اليومية، وقد التقينا من قبل بشيء غريب مثل هذا تمامًا. فالموجات والجسيمات في عالم الكم قابلة لأن يتبدل أحدها إلى الآخر، وهما وجهان للشيء نفسه، حتى وإن كنا في عالم حياتنا اليومية نفكر في أشياء كالإلكترونات على أنها جسيمات ونفكر في قوى مثل الكهرومغناطيسية بلغة من الموجات. ومن ثم فليست هذه بالوثبة المذهلة عندما نفكر في الجسيمات الحاملة للقوى على أنها قابلة للتبدل مع جسيمات المادة. في لغة الكم تنص السمترية الفائقة على أن الفرميونات يمكن أن تتحول إلى بوزونات والبوزونات إلى فرميونات. ولكننا لا نستطيع أن نحول أي فرميون قديم إلى أي بوزون قديم؛ كل نوع من أحد الجسيمات يجب أن يُقرن بالنوع الخاص به من شركاء السمترية الفائقة.

---

[4] السمترية الفائقة (سوسي): فكرة أنه قد لا يكون هناك نوعان مختلفان من الجسيمات للمادة والقوة (فرميونات وبوزونات)، وإنما هناك بدلًا من ذلك علاقة بين خواص هذه الجسيمات ذات البرم المختلف، بحيث إن هناك نوعًا واحدًا فقط من هذه الجسيمات، وإن كان عدد الجسيمات من هذا النوع الواحد سيكون أكثر في الطبيعة. تتنبأ السمترية الفائقة بوجود نوع جديد بأسره من الجسيمات يسمى السجسيمات Sparticles. حتى الآن ليس من دليل تجريبي يثبت وجود السجسيمات حقًا. (المترجم)

ولكن أين يوجد شركاؤهم هؤلاء؟ إننا نعرف من قبل أن اللبتونات والكواركات تأتي في صور لها علاقات فيما بينها، بحيث إن الإلكترون هو والنيوترينو الخاص به لهما «علاقة انتماء» بالكواركين العلوي والسفلي. ولكن جسيمات المادة المعروفة ليس لأي منها، بالمعنى الملائم للسمترية الفائقة، علاقة انتماء بأي من حاملات القوى، كما أن البوزونات المعروفة لا تربطها بأي من الفرميونات. لا يثير هذا انزعاجًا للمنظرين، وهم يطرحون اقتراحًا (مع الرياضيات الداعمة لهم) بأن أي نوع من الفرميونات المعروفة (كالإلكترون مثلًا) ينبغي أن يكون له شريك سوبر سمتري (هو في حالة الإلكترون يسمى سلكترون Selectron)، وهو شريك لم يُر قط، كما أن أي نوع من البوزون (كالفوتون مثلًا) ينبغي أن يكون له نظير فيرميوني (هو في حالة الفوتون يسمى فوتينو)، وهو أيضًا لم يُر قط. هذه الكيانات المفترضة تسمى معًا بجسيمات «سوسي». تستمر المحاجة بأن السبب في أن هذه الجسيمات لم تُر قط هو أنها أول كل شيء لها كتل كبيرة (ومن ثم فإنها لم يتم صنعها في أي تجارب معجلات على الأرض)، وثانيًا، فإنها غير مستقرة، ومن ثم فإنها تضمحل فورًا إلى مزيج من الأنواع المألوفة من الفرميونات والبوزونات وجسيمات «سوسي» الأخف. هناك استثناء واحد لذلك، إن كانت فكرة السمترية الفائقة فكرة صحيحة. بالنسبة لأخف هؤلاء «الشركاء السوبر سمتريين» (وهو فيما يحتمل الفوتينو) لا بد له من أن يكون مستقرًا، لأنه لا يمكن أن يوجد شيء أخف منه ليضمحل إليه.

السبب في أن هذه الحزمة من الأفكار تؤخذ جديًا هو أن تغيرات النموذج المعياري المطلوبة لإفساح مكان لأبسط صورة من السمترية الفائقة (التي تعرف بأنها الحد الأدنى من المسترية الفائقة) تنقل نقطة الالتقاء المتنبأ بها إلى اقترانات القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية، بحيث تلتقي كلها بالضبط عند نقطة من طاقة تبلغ حوالي ١٠^١٦ جيجا إلكترون فولت بدلًا من ١٠^١٥ جيجا إلكترون فولت. إضافة السمترية الفائقة إلى المعادلات تغير أيضًا من عمر النصف المتنبأ به للبروتون لترفعه فوق المستوى الذي تم التوصل إليه حتى الآن بالتجارب.

هكذا فإنه لا يوجد دليل على أن السمترية الفائقة خطأ، وربما سيوجد سريعًا بعض أدلة على أنها صواب. أحد أسباب انفعال الفيزيائيين بحماس

بشأن ما يتوقع من «معجل اصطدام الهادرون الكبير» هو أن هذا المعجل ينبغي أن يتمكن من إنتاج شركاء سوبر سمتريين لهم كتل تصل إلى عدة آلاف مثل لكتلة البروتون (أي عدة آلاف جيجا إلكترون فولت) وينبغي أيضًا أن ينتج هذا المعجل بوزونات هيجز. إذا حدث و«لم ينتج» المعجل جسيمات هيجز، فسيكون في هذا مفاجأة كبرى وسيتطلب ذلك إعادة التفكير في كل فكرة النظريات الموحدة الكبرى (وإن كان في هذا ما يثير بهجة الفيزيائيين لأنه سيمنحهم شيئًا يفكرون فيه). إلا أن أحد الأسباب التي تجعل هذا يبدو غير مرجح هو أن النظريات الموحدة الكبرى قد توصلت بالفعل إلى أحد الانتصارات. النظر في أصول هذا الانتصار أو هذا الدليل المواتي للنظريات الموحدة الكبرى يوضح كيف أن علماء فيزياء الجسيمات يزداد اتجاههم نحو علم الفلك للعثور على طرائق لاختبار نماذجهم.

أحد التنبؤات للحد الأدنى من السمترية الفائقة هو أن جسيمات النيوترينو ينبغي أن يكون لها كتلة ضئيلة. وفقًا للنموذج المعياري، بدون «سوسي»، ينبغي أن تكون جسيمات النيوترينو بلا كتلة مطلقًا، مثلها مثل الفوتون. ظل هذا لغزًا منذ أواخر ستينيات القرن العشرين، حتى صممت تجربة لمتابعة تدفق جسيمات النيوترينو من الشمس وأخذت التجربة تبين وصول جسيمات نيوترينو قليلة جدًّا إلى الأرض. جسيمات نيوترينو الإلكترون يتم إنتاجها بغزارة بواسطة التفاعلات النووية التي تجرى في قلب الشمس وتبقيها لامعة، وعدد هذه الجسيمات الذي يتدفق عبر الأرض (ومن خلالها) يمكن التنبؤ به من النماذج المعيارية للفيزياء النووية والفيزياء الفلكية. إلا أنه عندما أقام راي دافيز وزملاؤه تجربة لمتابعة تدفق جسيمات النيوترينو نفذوها وهم يعملون في منجم هومستيك في ليد بداكوتا الجنوبية، وجدوا فقط ما يقرب من ثلث العدد المتنبأ به. بافتراض صحة نماذج الفيزياء النووية والفيزياء الفلكية — وهناك أدلة وافرة مستقلة على صحتها — يكون أحد التفسيرات الممكنة هو أن جسيمات نيوترينو الإلكترون تتغير إلى أنواع أخرى من النيوترينو وهي في طريقها إلينا. تسمى هذه العملية بالتذبذب Oscillation، لأن جسيمات نيوترينو الإلكترون تتغير أثناء انتقالها في الفضاء إلى جسيمات نيوترينو الميون والتاو ثم تعود ثانية، أو تبقى مختلطة، لأن النيوترينوات الإلكترونية الأصلية ستكون مختلطة بكل الأنواع الثلاثة.

حيث إنه كل ما يوجد هو ثلاثة أنواع من النيوترينو، وهي مختلطة بالتساوي، فسينتج عن ذلك أن هذه العملية ستؤكد طبيعيًا على أن كشاف دافيز سيرصد فقط ثلث التدفق الأصلي من نيوترينوات الإلكترون، وأنه لن يستطيع أن «يرى» الأنواع الأخرى. ولكن هذا التذبذب لا يعمل إلا إذا كان لجسيمات النيوترينو كتلة. كان هذا هو الحال حقًا، وكان في ذلك اكتشاف درامي في سبعينيات القرن العشرين وفيه تطور من نوع جديد في الفيزياء. أنبأت اكتشافات «علم الفلك» الفيزيائيين بخصائص أضأل الجسيمات المعروفة. بعد هذه التجارب الرائدة أُجريت دراسات أخرى على جسيمات النيوترينو الشمسية وتمت ملاحظات مباشرة لتذبذبات النيوترينو في تجارب على الأرض وأكّد هذا كله أن علماء الفلك على صواب. جسيمات النيوترينو لها بالفعل كتلة (هي أقل من عُشر إلكترون فولت؛ وللمقارنة فإن كتلة الإلكترون تساوي ٥١١٠٠٠ إلكترون فولت)، وهي بالفعل تتذبذب. في أعقاب هذه الاكتشافات، كما سنرى سريعًا، أصبحت صلة الارتباط بين علم الفلك وفيزياء الجسيمات أقوى من أي مما كانت عليه.

عمومًا الجمع بين النظريات الموحدة الكبرى والسمترية الفائقة يبدو واعدًا لأقصى حد، ويصنع تنبؤات ينتظر أن يتم اختبارها قبل نهاية العقد الأول من القرن العشرين. إذا جرت الأمور كلها في هذه الاختبارات على الوجه الحسن، فستكون الخطوة التالية هي العثور على طرائق لدمج الجاذبية في هذه الحزمة، وصنع نظرية حقيقية (أو نموذجًا) لكل شيء. بصفة عامة ستكون طريقة التوصل إلى ذلك هي أن توصف التفاعلات الجذبوية بلغة من تبادل جسيمات تسمى الجرافيتونات،[٥] وأن يؤتى بالجاذبية داخل طيات «سوسي» بأن يُفترض وجود شريك سوبر سمتري هو الجرافيتينو. جسيمات الجرافيتون تنشأ طبيعيًا في أي نظرية كمومية للجاذبية، تمامًا مثلما تنشأ الفوتونات طبيعيًا في نظرية كمومية عن الكهرومغناطيسية، إلا أن إضافة الجرافيتينو هي التي تأتي بالجاذبية إلى الوصف السوبر سمتري للعالم. هذه التنويعات على لحن التوحيد يعطى لها اسم جامع هو «الجاذبية

[٥] الجرافيتون: جسيم افتراضي يحمل قوة الجاذبية، أي بوزون، ولم يكشف عنه بعد تجريبيًا، ولكن الفيزيائيين واثقون من وجوده. (المترجم)

الفائقة»[٦] Supergravity، إلا أنها كلها تتسم بالتخمين أكثر من أي مما ناقشناه إلى الآن، ولا تزال في حاجة لاختبارها بالتجربة. في أي نظرية كم للجاذبية، بما في ذلك الجاذبية الفائقة، لا بد لجسيمات الجرافيتون أن تكون بلا كتلة، مثل الفوتونات، وذلك حتى يكون للجاذبية نفس التأثير بمدى مسافة كبيرة مثل الكهرومغناطيسية. إلا أن الجرافيتونات بخلاف الفوتونات يمكنها (وفقًا للنماذج) أن يتفاعل أحدها مع الآخر، الأمر الذي يجعل إجراء الحسابات أصعب إلى حد هائل.

كما أنه يمكننا أن نصف الكهرومغناطيسية إما بلغة من الكم (الفوتونات) أو بلغة كلاسيكية (الموجات)، فبمثل ذلك تمامًا نجد أن الجاذبية يمكن أن توصف بلغة الجرافيتون أو بلغة من الموجات الجذبوية — وذلك كجزء من ثنائية الموجة والجسيم التي تعتبر في مركز نظرية الكم. هناك الكثير مما نتوقعه من دراسة الموجات الجذبوية في المستقبل القريب وهو أكثر كثيرًا مما نتوقعه من اختبار نماذج الجاذبية الفائقة بالتجارب. الجاذبية قوة يبلغ من ضعفها أنها تتطلب كشافات حساسة إلى أقصى حد لتعيين الموجات المصاحبة للجرافيتونات. إلا أن هذه الكشافات الآن لا تزال تحت الإنشاء والتجربة، وربما ستكشف عن إشعاع جذبوي خلال السنوات القليلة القادمة.

الموجات الجذبوية هي تنبؤ من نظرية أينشتاين عن النسبية العامة، وهي نظرية تتناول المكان (أو لو تحدثنا بدقة تتناول الزمكان) ككيان مرن يتشوه بوجود المادة (ونظرية أينشتاين هذه نظرية «كلاسيكية»، بمعنى أنها لا تتضمن عمليات كمومية). دعنا نفكر في الزمكان الخاوي على أنه يشبه ملاءة من المطاط (كالترامبولين) تمتد مسطحة، عندما تُدحرج كرات بلي زجاجية صغيرة عبر الملاءة ستتحرك في خطوط مستقيمة. ولكن إذا وضعنا جسمًا ثقيلًا فوق الملاءة، مثل كرة بولنج، فسوف يحدث انبعاجًا؛ لو دحرجت كرات البلي الآن قرب الجسم الثقيل فإنها ستتبع مسارات منحنية حول الانبعاج. إذا وضعنا الرياضيات المناسبة في الصورة، فإنها ستفسر

---

[٦] الجاذبية الفائقة: اسم يطلق على عدد من النظريات تحاول تفسير كل قوى الكون في إطار واحد، وهي نظريات توحد النسبية العامة بالسمترية الفائقة، على أنه ما من نظرية منها قد نجحت بالكامل. (المترجم)

بدقة السبب في انحراف الضوء عندما يمر بالقرب من الشمس، ومقدار هذا الانحراف — وهذا تنبؤ من نظرية أينشتاين تم اختباره على نحو مشهور وتأكد بالأرصاد التي أجريت أثناء كسوف للشمس في ١٩١٩.

ولكننا إذا ذهبنا بالأمر إلى مرحلة أبعد، نستطيع أن نتصور أن كرة البولنج تتواثب إلى أعلى وأسفل فوق ملاءة المطاط وتصنع تموجات في نسيجها. عندما تهتز المادة بالطريقة المناسبة في الكون ككل سينتج عن ذلك تموجات في الزمكان، حسب معادلات أينشتاين، وينبغي أن يكون في الإمكان الكشف عن هذه التموجات في شكل موجات في المكان (الفضاء) ذي الأبعاد الثلاثة. يكون هذا التأثير في الواقع صغيرًا نوعًا، لأن الجاذبية قوة بالغة الضعف عندما تقارن بالقوى الثلاث الأخرى للطبيعة — وأي بنى منتظمة في الكون (بما فيها نحن أنفسنا) سوف تتفتت بالإشعاع الجذبوي وهو يمر جيئة وذهابًا عبر الكون. على أن أشد «الاهتزازات» التي تنتج عن المادة، مثل تقلص أحد النجوم إلى ثقب أسود،[٧] هي مما ينبغي أن ينتج عنه تموجات كبيرة في الفضاء يكفي حجمها لأن يكتشفها الجيل الجديد من أجهزة الكشف. هناك أدلة واضحة على وجود الإشعاع الجذبوي أتت بالفعل من الدراسات الفلكية لمنظومة تعرف «بالنابض الثنائي»، وفيها يوجد نجمان من نجوم النيوترون[٨] يدور أحدهما حول الآخر. هكذا فنحن نعرف على وجه التأكيد أن أينشتاين كان مصيبًا وأن هناك وجود لهذا الإشعاع. إلا أن الفيزيائيين ما زالوا في لهفة للكشف عن الموجات الجذبوية هنا فوق الأرض، وينبغي أن يصلوا إلى ذلك سريعًا جدًّا.

لسنا نهدف إلى الدخول في تفاصيل كثيرة حول كل التجارب التي سنذكرها في هذا الكتاب؛ فالنتائج لها أهمية أكبر من ذكر تفاصيل طريقة التوصل لها. ولكن لعل الأمر يستحق أن نختار مثلًا واحدًا ليمثل لنا نوع

---

[٧] الثقب الأسود: منطقة في الزمكان لها جاذبية قوية جدًّا لا يستطيع أي شيء أن يفر منها، ولا حتى الضوء؛ فلا يمكن رؤيتها. الثقب الأسود النجمي بقية منضغطة لنجم ميت. (المترجم)

[٨] نجم نيوتروني: نجم قد استنفد وقوده النووي فتقلص على نفسه حتى استقر في حجم صغير كنجم نيوتروني، وهي نهاية تتوقف على كتلة النجم الأصلي. النجم النيوتروني نجم بارد يقوم على التنافر بين النيوترونات. (المترجم)

التعاون الدولي الذي يشمل فرقًا كبيرة من الباحثين هي الشكل النمطي الآن لطريقة أداء العلم في العقود الأولى من القرن الحادي والعشرين.

يجرى الآن العمل في أربع من هذه التجارب الجديدة عن الموجة الجذبوية. أكبرها وهي «ليجو LIGO» في الولايات المتحدة، هناك أيضًا تجربة في اليابان اسمها «تاما TAMA»، وتجربة فرنسية إيطالية مشتركة اسمها «فيرجو VIRGO»، وتجربة سنصفها بشيء من التفصيل، وفيها كشاف بريطاني ألماني مشترك يعرف باسم «جيو ٦٠٠ GEO600». ليست هذه التجارب مجرد تنافس تتكرر فيه لأربع مرات جهود قد يعتقد القارئ أنه كان ينبغي أن تكرس لمشروع عالمي واحد. يحتاج الأمر لكشافين اثنين على الأقل لمجرد أن نتأكد من أننا قد اكتشفنا حقًّا موجات جاذبية، لأنهما قد سجلا معًا هذه الذبذبات في الوقت نفسه، بما يثبت أن الموجات ليست اضطرابًا محليًّا ناجمًا عن مرور شاحنة أو انهيار أرضي. كذلك فإنه حتى نعيّن موضع مصدر الموجات في السماء، وخصائص أخرى تفصيلية للإشعاع، نحتاج إلى كشافات عددها أربعة على الأقل. تعمل الأجهزة كلها على أساس مبادئ متماثلة، ولكن جهاز «جيو ٦٠٠» هو من بعض النواحي أكثرها رقيًّا وتعقدًا، ذلك أن وجود قيود مالية شديدة قد أدى إلى إجبار القائمين بالتجربة على استخدام أقصى الإبداع لتطوير تكنولوجيا جديدة لإنجاز أهدافهم. أدت القيود المالية نفسها إلى إجبار الفرق البريطانية والألمانية على التعاون معًا في نهاية ثمانينيات القرن العشرين تعاونًا ثبت في النهاية أن له نتائجه البهيجة، ذلك أن كلًّا من بريطانيا وألمانيا لا تستطيع أن تتحمل وحدها تكلفة كشاف موجات جذبوية خاص بها. هذه تقريبًا هي الطريقة نفسها تمامًا التي تؤدى بها مشروعات العلم الكبير في القرن الحادي والعشرين، وكما سوف نرى، فإن من النادر جدًّا في أبحاث الطليعة الآن أن ينفذها بلد واحد يعمل منعزلًا، (ناهيك عن أن تنفذها مجموعة بحث واحدة في جامعة واحدة). ولَّت منذ زمن طويل أيام العبقري الواحد الفريد — كنيوتن أو أينشتاين.

اختصار جيو GEO كاسم للمشروع تأتي من أول حروف «المرصد الأوروبي الجذبوي Gravitational European Observatory» — الترتيب

الأكثر طبيعية للكلمات هو المرصد الجذبوي الأوروبي European Gravitational Observatory، إلا أنه كان هناك إحساس بأنه ستكون له عندها اختصار (EGO)[٩] وهي تعطي صورة عامة في اتجاه خطأ، حتى لو كان القائمون بالتجربة يرون في أنفسهم أنهم يرقون بالفعل لمنزلة عالية. الرقم «٦٠٠» يشير إلى حجم التجربة، فهي تتكون من ذراعين طول كل منهما ٦٠٠ متر وكل منهما يتعامد على الآخر في شكل حرف L. أُملي حجم الذراعين حسب الحيز المتاح، حيث الموقع فوق أرض زراعية جنوب هانوفر مباشرة تملكها ولاية بافاريا وتقوم جامعة هانوفر بتشغيلها كمركز للأبحاث الزراعية. الذراعان مبنيان بجانب طرق مزارع تفصل الحقول، بين محاصيل من الحبوب والفاكهة. أحد الذراعين يبرز في الحقيقة خارجًا عبر حد منطقة الأبحاث الزراعية، إلى أرض مزرعة مجاورة مسافة ٢٧ مترًا. ميزانية «جيو ٦٠٠» تدفع للمزارع مبلغ ٢٧٠ ماركًا سنويًا كإيجار لاستفادتها منه.

يحوي كل ذراع في التجربة أنبوبًا قطره ٦٠ سنتيمترًا لا غير مصنوعًا من معدن مموج سمكه ٠٫٨ من الملليمترات فقط. يوجد داخل الأنابيب فراغ خال مثل الفضاء، وهناك مرايا معلقة في الفراغ لتعكس ضوءًا يأتي من حزمة ليزر يضاء بطول الأنبوب. تزن كل مرآة ستة كيلوجرامات وهي معلقة بأربعة «أسلاك» مصنوعة من الزجاج وسمكها ٢٠٠ جزء من المليون من المتر. رتبت المنظومة كلها برهافة بالغة بحيث إنه بتحليل إشارات الضوء التي ترتد من المرايا بواسطة أشعة الليزر يتمكن الباحثون في النهاية من قياس أي تغيرات في طول كل ذراع من الكشاف لما يقل عن $١٠^{-١٨}$ من الأمتار (أي أقل من جزء من مليار من المليار من المتر، أو لجزء من المليون من قطر البروتون). في نهاية ٢٠٠٤ أخبرني جيم هوف رئيس الفريق البريطاني في جامعة جلاسجو، بأن نتائج هذا الاختبار وصلت حساسيتها إلى ما يقل عن هذا الهدف بما يقرب من عامل من عشرة (أي أنها بدقة تصل «فقط» إلى $١٠^{-١٧}$ من الأمتار)، وأن «جيو ٦٠٠» ينبغي أن يعمل بالحساسية المرسومة له بحلول نهاية ٢٠٠٦.

---

[٩] كلمة Ego مصطلح في علم النفس يعني الأنا، أو الذات، وفيه شحنة من الغرور. (المترجم)

وفقًا لنظرية النسبية العامة، ينبغي أن ينتج عن الموجات الجذبوية «بصمة» متميزة وهي تمر خلال التجربة، فتؤدي أولًا إلى مط أحد الذراعين بما يقرب من هذا المقدار وتضغط في الوقت نفسه الذراع الآخر، وبعدها تنعكس العملية. الأمر وكأن هناك زلزلة في الزمكان تجعلك معًا في نفس الوقت أكثر طولًا وأكثر نحولًا، ثم تنعكس لتجعلك أقصر طولًا وأكثر بدانة. هذا النمط المتميز من الأحداث هو الذي يجعل في الإمكان قياس هذه التغيرات الضئيلة. على أنه حتى منظومة «جيو ٦٠٠» لا تستطيع قياس طول أنبوب واحد مفرغ قياسًا بهذه الدقة، وإنما يستطيع العلماء قياس التغيرات النسبية في الذراعين بواسطة مقارنة الطريقة التي تتداخل بها حزم الليزر في ذراعي الجهاز إحداها مع الأخرى. إذا وجدت إشارة كهذه في «جيو ٦٠٠» في الوقت نفسه الذي تقاس فيه تغيرات مماثلة في كشاف «ليجو» أو أحد أجهزة الكشف الأخرى، فسيعرف الباحثون عندها أنهم قد رصدوا مرور موجة في الفضاء من خلال الأرض. عندما نتجاوز ما سيحدث من إثارة وإنفعال عند أول اكتشاف — وهو ما يمكن أن يحدث الآن في أي وقت — نجد أن رصد أحداث من هذا النوع في المستقبل سيوفر لنا تبصرًا نافذًا بالنسبة لأكبر انفجار في الكون، وربما يوفر تبصرًا نافذًا في طبيعة «الانفجار الكبير» نفسه.

يقول هوف إن هناك احتمالًا نسبته ٥٠ في المائة بأن «جيو ٦٠٠» سيلتقط إشارة من هذا النوع بحلول سنة ٢٠٠٩. إذا فشل في ذلك، فستكون الخطوة التالية هي الارتقاء بتجربة «ليجو» بوضع كشافات مؤسسة على التصميمات الرائدة «لجيو ٦٠٠» في التجربة الأكبر. (لدى ليجو ذراعان بطول ٤ كيلومترات، ولكن كشافاته أقل رقيًا، وتعطيه ما يقرب من حساسية «جيو ٦٠٠» في وضعه الحالي). ثم يقول هوف أنه متأكد «بنسبة مائة في المائة» من أن الإشعاع الجذبوي سيتم الكشف عنه في العقد الثاني من القرن الحالي. أحد أسباب ثقته هذه أنه مهما كان ما سيحدث في التجارب المؤسسة فوق الأرض، فإن ناسا تجرى تجربة في الفضاء تعرف باسم «ليزا LISA» (وهو اختصار الكلمات Laser Interferometric Space Antenna الهوائيات الفضائية لقياس تداخل الليزر)، وهذه التجربة محدد لانطلاقها

سنة ٢٠١٢. ستتألف هذه التجربة من ثلاث سفن فضاء تطير في تشكيل في مدار حول الشمس، وكل منها تبتعد عن الأخرى بمسافة ٥ ملايين كيلومتر عند زوايا مثلث. هناك حزم ليزر تربط مجسات الفضاء الثلاثة ولها القدرة على قياس التغيرات في المسافات التي تفصلها، والتي تنتج عن فعل الموجات الجذبوية وهي تضغط وتمط الفضاء نفسه، وذلك بدقة تصل إلى ما يقرب من جزء من مائة ألف من المليون من المتر (١٠ بيكو متر).

في الوقت نفسه، فإنه بصرف النظر عن تقدم الأبحاث عن الإشعاع الجذبوي، فإن الأبحاث عن نظرية لكل شيء قد تلقت دفعة تعزيز لها في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، عندما ثبت في النهاية أن إحدى فئات النماذج التي تم إنشاؤها دون أن توضع الجاذبية في الذهن، تتضمن أوتوماتيكيًّا بوزونات فيها كل الخصائص المناسبة لأن تكون حاملات التفاعل الجذبوي. نماذج «الأوتار» هذه هي حاليًّا أكثر النماذج إثارة عندما يصل الأمر إلى محاولة العثور على نظرية لكل شيء.

نشأت فكرة الأوتار جزئيًّا على ما لدى الفيزيائيين الرياضيين من اهتمام داخلي جوهري باللعب بالمعادلات، كما نشأت جزئيًّا عن مشكلة عملية جدًّا تصاحب كل النماذج التي تتعامل مع الجسيمات كنقط ليس لها نصف قطر أو حجم. المشكلة هي أنه في أوضاع كالوضع الذي يصف القوة الكهربائية مثلًا، على أنها في تناسب مع الواحد مقسومًا على مربع المسافة من الإلكترون، إذا كان الإلكترون بلا حجم، فإن المسافة يمكن أن تنخفض حتى الصفر. القسمة على صفر تعطينا نتيجة من لا نهاية، والمعادلات التي تعطي نتيجة من اللانهاية معادلات غير معقولة. التحايل على ذلك يكون باستخدام حيلة تسمى إعادة التطبيع، وفيها يحدث أن نقسم أساسًا إحدى اللانهائيات على الأخرى لنحصل على إجابة معقولة. نستطيع أن نجعل هذا ينجح نجاحًا مُرضيًا في النموذج المعياري وفي الديناميكا اللونية الكمومية، إلا أن هذا في الحقيقة ملاذ لا يُنصح باللجوء إليه إلا عند اليأس. هناك كثير من الفيزيائيين المرموقين، بما فيهم ريتشارد فينمان، يعتبرون أن إعادة التطبيع علامة على أن النماذج فيها خطأ شديد.

تعتبر نظرية الأوتار أن الكيانات الأولية التي يصنع منها العالم الفيزيقي مصنوعة من أشياء ممتدة — الأوتار — بدلًا من النقط. الأوتار

قد تكون مفتوحة وأطرافها حرة، أو هي مغلقة لتصنع حلقات حجمها بالغ الصغر. كما أنها، حسب النماذج، توجد بمقاييس تكون حتى أصغر من أي شيء نظرنا أمره حتى الآن — وبقدر ما يكون لفكرة الطول من معنى بهذه المقاييس، فإن طول الوتر يقرب من ١٠-٣٣ سنتيمترًا. مقدار هذا الطول يقرب من جزء من المائة من مليار من المليار (أو ١٠-٢٠) من نصف قطر البروتون، أو بطريقة أخرى لو كان عرض البروتون مائة من الكيلومترات، فسيكون الوتر بحجم البروتون. لا يوجد مطلقًا أي توقع لاختبار هذه الأفكار بالكشف عن الأوتار كشفًا مباشرًا، ومن ثم فإن فكرة الأوتار تظل قائمة أو تسقط بواسطة ما تصنعه من تنبؤات حول طبيعة العالم بمقياس أشياء مثل البروتونات. (على أن هذا قد يكون الموضع الملائم لأن نذكّر القارئ بأنه ليس من المهم ما إذا كان العالم مصنوع «حقًّا» من أوتار ضئيلة الحجم، وإنما المهم فقط ما إذا كان العالم يسلك «وكأنه» مصنوع من أوتار ضئيلة الحجم). هناك أمران بشأن نماذج الأوتار يجعلان منها حاليًّا موضوعًا ساخنًا مثيرًا: أولهما: أن إحدى فئات نماذج الأوتار لا تحتاج إلى إعادة التطبيع، أو الأولى أن النماذج فيما يبدو تعيد تطبيع نفسها أوتوماتيكيًّا، دون مساعدة من الرياضيين، اللانهائيات تُلغَى كلها بنفسها. النقطة الثانية — وهي الأهم كثيرًا في أعين معظم الفيزيائيين — هي: أن نماذج الأوتار تتضمن الجرافيتون. كان الأمر مفاجئًا. المنظرون الذين كان لهم دور في اللعب بنظرية الأوتار في ثمانينيات القرن العشرين لم ينطلقوا بعيدًا بالتفكير جديًّا بشأن الجاذبية (وإن ظلت فكرة نظرية كل شيء وهي باقية دائمًا في الخلف من عقولهم)، وكان هؤلاء المنظرون يصابون بالحيرة والانزعاج معًا عندما يجدون أنهم حتى يجعلوا معادلاتهم متوازنة، فإن نماذجهم تتطلب وجود جسيم لا يتلاءم مع متطلبات النموذج المعياري وقد أضيفت إليه النظريات الموحدة الكبرى. عندما تفهموا الأمور، وأدركوا أن هذا الجسيم هو الجرافيتون، حدث انطلاق كرحلة طائرة للموضوع كله. على أن رحلة الطيران التي انطلقت بهم هكذا تبدو رحلة عجيبة بالنسبة للغرباء عن الأمر.

الثمن الذي يجب أن يُدفع لنجاح نظرية الأوتار هو أن نتقبل فكرة وجود أبعاد إضافية للمكان (الفضاء) تتجاوز وتزيد عن الأبعاد الثلاثة

المكانية (أمام-خلف، وأعلى-أسفل، ويسار-يمين) مضافًا إليها البعد الرابع، أي الزمان، وهي كلها الأبعاد التي نلقاها في الحياة اليومية. من الغريب أن هذه الفكرة ترجع إلى عشرينيات القرن العشرين، عندما كان الفيزيائيون يعرفون أمر نوعين فقط من التفاعل، الجاذبية والكهرومغناطيسية. بدا لفترة وجيزة، استمرت حتى تعيين التفاعلات النووية، وكأن إضافة بُعد خامس ستوفر في عشرينيات القرن العشرين ما يساوي نظرية لكل شيء، وذلك بتوحيد هذين التفاعلين، إلا أن الفكرة أهملت عندما تم اكتشاف المزيد من التفاعلات، ولم يعاود أحد إحياء هذه الفكرة إلا بعد مرور نصف قرن.

تقفز هذه الفكرة خارجة من نظرية أينشتاين عن النسبية العامة التي تصف الجاذبية بأنها تشوهات في نسيج الزمكان ذي الأبعاد الأربعة. في ١٩١٩ تساءل تيودور كالوزا الرياضي الألماني الشاب عما ستبدو عليه معادلات أينشتاين إذا كُتبت بتوسع لتصف تشوهات في زمكان له خمسة أبعاد. لم يكن لديه أي سبب للتفكير في أن معادلات كهذه ستعني أي شيء فيما يختص بالعالم الفيزيقي؛ كان فحسب يستكشف هذا الإمكان من باب الفضول الرياضي. ووجد أن صورة النسبية العامة ذات الأبعاد الخمسة مصنوعة من مجموعتين من المعادلات: المعادلات المألوفة لنظرية النسبية العامة نفسها، ومجموعة من معادلات مألوفة أكثر تشابه بالضبط معادلات ماكسويل عن الكهرومغناطيسية. بتبسيط موجز، إذا كان يمكننا التفكير في الجاذبية كتموج في زمكان له أربعة أبعاد، فإنه يمكننا التفكير في الكهرومغناطيسية كتموج في زمكان له خمسة أبعاد. طُورت الفكرة لأبعد، لتتضمن أفكارًا من نظرية الكم، وذلك بواسطة أوسكار كلاين الفيزيائي السويدي، وأصبحت معروفة باسم نموذج كالوزا-كلاين. تنجح الرياضيات هنا نجاحًا كاملًا؛ فالعقبة الوحيدة أنه لا يوجد أثر لأي بعد خامس (أي لبعد «مكاني» رابع) في حياتنا اليومية. إلا أن الفيزيائيين يتحايلون على ذلك باستخدام حيلة تسمى التدميج Compactification.

أفضل طريقة لفهم التدميج هي بواسطة أحد الأمثلة. إذا كان هناك ملاءة رفيعة من مادة مرنة كالمطاط فإنها تكون فعلًا شيئًا له ثلاثة أبعاد، ولكنها من مسافة بعيدة ستبدو وكأنها ببعدين اثنين لأن سمكها لا يظهر

للعيان. سنزعم بهدف ضرب المثل أن هذه الملاءة هي حقًّا ببعدين اثنين. يمكننا أن نأخذ الأمر لمرحلة أبعد بأن نلف الملاءة لتصنع أنبوبًا، حروفه ملتصقة معًا. ستكون الملاءة ذات البعدين ملفوفة حول البعد الثالث، وإذا نظرنا إليها من مسافة أبعد حتى مما سبق فستبدو الآن وكأنها خط ببعد واحد. إلا أن كل «نقطة» على الخط هي حقًّا دائرة صغيرة، أو حلقة حول الأنبوب، ويمكن أن تنطلق تموجات في البعد الثاني (ما يمكن أن نسميه البعد لأعلى-أسفل) وتنطلق أعلى وأسفل الأنبوب حتى وإن كنا لا نستطيع رؤيتها — وهي تموجات تحمل طاقة، ومن ثم فإنها تؤثر في سلوك الخط كله. أحد البعدين الاثنين للملاءة مخبوء عنا لأنه ببساطة أصغر من أن يرى، ولكنه لا يزال يجعل تأثيره محسوسًا. بطريقة مماثلة، نجد في نموذج كالوزا-كلاين الأصلي أن البعد الرابع للمكان يمكن تصوره بتخيل أن كل نقطة في زمكان بأربعة أبعاد هي حقًّا حلقة صغيرة، عرضها فقط ١٠-٣٢ سنتيمترًا، وقد حُنيت لتلف فيما حولها في بعد خامس.

بدا على الأقل بالنسبة لبعض الفيزيائيين، أن هذا ثمن نتقبل دفعه للحصول على مجموعة واحدة من المعادلات لوصف كل تفاعل معروف. بلغة الكم نجد أن نموذج كالوزا-كلاين بسيط نسبيًّا لأن عليه أن يتعامل مع بوزونين فقط: الجرافيتون، والفوتون. ولكن سرعان ما عُرف المزيد من التفاعلات الأكثر تعقيدًا. حتى تشمل الحزمة التفاعل القوي والتفاعل الضعيف بكل بوزوناتهما فإن هذا يتطلب المزيد من الأبعاد تكون ملفوفة بطرائق أكثر تعقيدًا، وكان هذا ببساطة يزيد عما يمكن تقبله في ذلك الوقت، ومن ثم فإن نموذج كالوزا-كلاين أصبح لا يزيد عن أن يكون تحفة غريبة، بينما النموذج المعياري يزداد تناميًا. إلا أنه نشأ لاحقًا جيل من الفيزيائيين الرياضيين أصبحوا أكثر تقبلًا لهذه الطريقة للمقاربة[١٠] بالأبعاد المتعددة، وبحلول ثمانينيات القرن العشرين أصبح من الواضح أن هناك حاجة إلى طريقة مقاربة مختلفة اختلافًا عنيفًا للانتقال من النموذج

[١٠] هذا أمر معتاد في العلم؛ ففي وقت ما قيل إن نظرية النسبية العامة لا يفهمها إلا ثلاثة رجال، والآن تدرس هذه النظرية لطلبة الجامعة. الأفكار الثورية عند أحد الأجيال تصبح أفكارًا عادية للجيل التالي.

المعياري إلى نظرية لكل شيء. هذه المقاربة الجديدة تجمع بين فكرة الأوتار وفكرة الأبعاد الإضافية.

حلقات الأوتار البالغة الصغر التي وصفناها فيما سبق يُنظر إليها في شكلها الحديث في القرن الحادي والعشرين على أنها ملفوفة في أبعاد يبلغ مجموعها الكلي ستة وعشرين بعدًا. الأشياء المختلفة التي تعودنا على أن نفكر فيها كجسيمات (الإلكترونات، والجلونات، وما إلى ذلك) تناظر الذبذبات المختلفة للأوتار، التي تحمل كميات مختلفة من الطاقة، بما يشابه وجود ذبذبات مختلفة لوتر الجيتار تناظر النغمات الموسيقية المختلفة. يمكننا تفسير الفرميونات بطريقة بسيطة نسبيًّا، بلغة من ذبذبات في عشرة أبعاد تجري في اتجاه واحد حول حلقات من الأوتار. ستة من هذه الأبعاد متدامجة، لتترك جانبًا الأبعاد الأربعة المألوفة للمكان-الزمان. على أن ثراء عالم البوزونات يتطلب ذبذبات في ستة وعشرين بعدًا، تجري في الاتجاه الآخر حول حلقات الأوتار. هناك ستة عشر بعدًا من هذه الأبعاد مطلوبة لتفسر التنوع الثري للبوزونات، وهذه الأبعاد تتدامج كمجموعة بحيث إنها بمعنى ما تكون «في الداخل» من الأوتار ذات الأبعاد العشرة. ليس هناك من هو متأكد تمامًا مما يعنيه هذا بالضبط، ويتناقش المنظرون حول ما إذا كانت هذه الأبعاد «حقيقية». على أنه من وجهة نظرنا الأمر المهم هو أن البوزونات تسلك «وكأنها» عندها هذه الأبعاد الإضافية مصاحبة لها. الأبعاد العشرة الأخرى تماثل تلك التي تحدث فيها الذبذبات الفرميونية. تتدامج ستة من هذه الأبعاد بحيث ينتج عن الأوتار المتذبذبة مظهر جسيمات تتحرك في الزمكان ذي الأبعاد الأربعة. يتطلب النموذج وجود مجموعتين مختلفتين من الذبذبات تحدث فوق نوع حلقة واحد، ولهذا السبب فإنه يشار إليه أحيانًا على أنه نظرية الأوتار المهجنة.

ثمة شيء إضافي غريب حول هذا الأمر، فيه ما يلقي ضوءًا كاشفًا على فهمنا غير المكتمل للأبعاد الستة عشر «الإضافية». من الممكن فعلًا وصف الجسيمات كلها بلغة من ثمانية من الستة عشر بعدًا المتدامجة، بما يترك متسعًا لمجموعة من نسخة مطابقة من الجسيمات. لا أحد يعرف تمامًا ما يعنيه ذلك بدوره، إلا أن بعض المنظرين يخمنون أنه ربما يكون هناك

«كون شبحي» كامل مصنوع من هذه النسخة المطابقة من الجسيمات، وهو يتشارك مع زمكاننا ذي الأبعاد الأربعة ولكنه لا يتفاعل معنا، إلا فيما يحتمل بالجاذبية. يستطيع شخص شبحي أن يمشي من خلالك مباشرة دون أن تلحظ أنت ذلك. ولكننا سنترك المزيد من التخمين على هذه الوتيرة لمؤلفي روايات الخيال العلمي. حدث تقدم حقيقي في نظرية الأوتار في السنوات الأخيرة أتى من إعادة تفسير الجزء الآخر من النموذج، الجزء المكون من عشرة أبعاد.

حتى الآن تحدثنا عن نظرية الأوتار بصيغة المفرد، وكأن هناك نموذجًا واحدًا لا غير يتلاءم مع النظرية. هذه هي اللغة المتفائلة التي يستخدمها منظرو الأوتار أنفسهم، إلا أنه في السنوات العشر من منتصف الثمانينيات إلى منتصف التسعينيات من القرن العشرين كان هذا يخفي وراءه حقيقة مربكة. كان هناك (ولا يزال هناك) بالفعل خمسة نماذج مختلفة، تنويعات على لحن الأوتار، كل منها يطرح تفسيرًا لما يجري يختلف اختلافًا حاذقًا رهيفًا، ولكنها كلها تتضمن ستة أبعاد متدامجة لوتر يتذبذب متحركًا في زمكان بأربعة أبعاد (يضاف إليها الأبعاد البوزونية الإضافية الستة عشر التي لا يفهمها أحد فهمًا مناسبًا). لم يكن في هذا ما يزعج الفيزيائيين بمثل ما قد يظنه القارئ، ذلك لأنهم تمكنوا من أن يبرهنوا رياضيًا على أن هذه هي النماذج «الوحيدة» الممكنة — يمكن للفيزيائيين أن يحلموا بصور رياضية لنماذج للأوتار من أنواع أخرى، ولكنهم يستطيعون أن يبينوا أن كل هذه النماذج ذات لانهائيات لا يمكن إعادة تطبيعها وليس لها أي معنى على الإطلاق.

هناك أيضًا ما يشبه ورقة «الجوكر» في رزمة أوراق اللعب — نسخة واحدة من نوع نموذج آخر يسمى الجاذبية الفائقة، بدا أنه يفسر الأمور كأي من نماذج الأوتار الخمسة، ولكنه يتطلب وجود أحد عشر بعدًا بدلًا من عشرة. ثبت في النهاية أن حقيقة أن الجاذبية الفائقة تنجح فقط في أحد عشر بعدًا ليست فيها نزوة غريبة، وإنما فيها مفتاح مهم لتفسير ما يجري.

بعد جهود هائلة لمنظرين كثيرين في السنين الأولى من تسعينيات القرن العشرين أخذ إد ويتن الفيزيائي الأمريكي يشد كل الخيوط معًا بأن

أضاف بعدًا إضافيًّا لنظرية الأوتار. وأوضح أن كل النظريات الست المرشحة لنظرية لكل شيء هي أوجه مختلفة لنموذج أساسي واحد Master أسماه نظرية إم الكهرومغناطيسية والتفاعل الضعيف يبدوان كشيئين مختلفين عند الطاقات المنخفضة، ولكنهما في الحقيقة مظهران مختلفان لتفاعل واحد هو الكهروضعيف، وبمثل ذلك تمامًا فإن النظريات الست المرشحة لأن تكون نظرية لكل شيء هي مظاهر عند الطاقة المنخفضة لنظرية واحدة هي نظرية إم وهي مظاهر لا تظهر تجريبيًّا إلا إذا تمكنا من توليد طاقات تساوي طاقات التفاعل القوي. الثمن الذي كان على ويتن أن يدفعه للنجاح هو أن يُدخل بعدًا إضافيًّا للمكان على نماذج الأوتار، بحيث إنها ستعمل، مثل الجاذبية الفائقة، في مكان-زمان ذي أحد عشر بعدًا. وجود بعدٍ آخر متدامج بالغ الصغر قد لا يبدو كثيرًا كخطوة للأمام عندما يكون لدينا من قبل ستة منها، ولكن هذا البعد «الجديد» في نظرية إم ليس عليه بأي حال أن يكون بالغ الصغر، فمن الممكن أن يكون كبيرًا جدًّا، وإن كان مع ذلك لا يمكن الكشف عنه، لأنه يقع باتجاه عمودي بالنسبة لكل الأبعاد الثلاثة المألوفة للمكان. الكائن الذي له أصلًا بعدان ويقيم في عالم ذي بعدين سيكون غير مدرك للبعد الثالث،[11] وبالطريقة نفسها فإننا نحن كائنات الأبعاد الثلاثية لا ندرك هذا البعد الرابع (أو العاشر!) للمكان.

الطريقة التي يغير بها ذلك من صورتنا الذهنية عما يجري هي أننا بدلًا من التفكير في الجسيمات على أنها مما يمكن الكشف عنه من النتائج المترتبة على أوتار متذبذبة، بدلًا من هذا علينا أن نفكر بلغة من صفحات Sheets متذبذبة، أو أغشية متذبذبة. ولهذا السبب، فإنه على الرغم من أن ويتن لم يحدد أبدًا ما يرمز له حرف إم في نظرية إم، فإنه بالنسبة لأفراد كثيرين يرمز الحرف لكلمة Membrane (الغشاء). وبطريقة أكثر فنية، فإن الصفحة ذات البعدين تسمى two-brane، بران-اثنان، وهذه النماذج يوجد فيها بنى مرادفة (وإن كان تصورها أصعب) لكل الأبعاد حتى عشرة أبعاد، تعرف باسم تصنيفي شامل هو برانات-بي p-branes

[11] وصف إدوين أبوت هذا الموقف وصفًا ممتعًا في مؤلفه الكلاسيكي «الأرض المسطحة» Flatland (١٨٨٤)، كما وصفه إيان ستيوارت عندما أعاد حديثًا صياغة هذه الحكاية.

حيث p يمكن أن تكون أي عدد صحيح أقل من عشرة. هكذا يكون أحد الأوتار «بران-واحد one-brane».

إحدى النتائج التي تترتب على هذا كله هي أن كوننا بأسره يمكن أن يكون بران-٣ مطمورًا في أبعاد أكثر. ينشأ عن هذا احتمال أنه يمكن أن توجد أكوان أخرى ذات أبعاد ثلاثة بجوارنا مباشرة، مطمورة أيضًا في أبعاد أكثر، ولكنها مما لا يمكننا تمامًا التوصل إليه، على نحو يشبه أنك يمكنك أن تعتبر أسطح صفحات أحد الكتب كسلسلة من أكوان من بعدين، كل واحد منها يجاور الآخر مباشرة، ولكن كل منها يبدو لأي كائنات ذات بعدين تقيم فيه أنه كل العالم بأسره.

تأخذنا هذه الأفكار إلى عالم من التخمين، وإن يكن تخمينًا له احترامه، لكن ليس هناك أي توقع مباشر لاختبارها في أي تجربة أو معجل يمكننا أن نبنيه فوق الأرض. إلا أن لدينا بالفعل طريقة للتوصل إلى معلومات من حدث كانت الظروف فيه بالغة التطرف، بحيث إن تأثير عمليات نظرية إم، والأوتار والأغشية؛ ربما يكون قد ترك علامة مميزة. يُطرح في أحسن فهم لنا للعالم الذي نعيش فيه أنه قد انبثق من حالة متطرفة من ارتفاع الضغط والحرارة، في انفجار كبير منذ ما يقرب من ١٤ مليار سنة. وصلت الأرصاد الفلكية الآن إلى دقة بالغة حتى إن العلماء يستطيعون استخدام هذه البيانات لاختبار بعض تنبؤات نظرية الجسيمات عما حدث في الانفجار الكبير نفسه. علم الفلك وعلم فيزياء الجسيمات قد اندمجا ليصيرا علم فيزياء الجسيمات الفلكية. إذن فإن الخطوة المنطقية التالية في سبر سلوك المادة وهي في أصغر المقاييس هو أن نتطلع خارجًا في الفضاء إلى سلوك المادة وهي في أكبر المقاييس كلها، مقياس الكون نفسه، وأن نبحث من أين أتى هذا كله.

الفصل الثالث

كيف بدأ الكون؟

من المتفق عليه حاليًا على نحو واسع أن الكون الذي نقيم فيه قد انبثق من كرة نار ساخنة كثيفة تسمى «الانفجار الكبير». في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين اكتشف الفلكيون لأول مرة أن مجرتنا هي مجرد جزيرة واحدة من النجوم موجودة بين مجرات كثيرة مماثلة مبعثرة، ثم اكتشفوا أن مجموعات هذه المجرات تتحرك متباعدة إحداها عن الأخرى، إذ يمتد الفضاء بينها. والواقع أن هذه الفكرة عن تمدد الكون تنبأت بها نظرية أينشتاين للنسبية العامة التي اكتملت في ١٩١٦، ولكن هذه الفكرة لم تؤخذ جديًا حتى توصل الراصدون لاكتشافاتهم. وعندما أُخذت النظرية جديًا اكتشف الرياضيون أن المعادلات تصف بالضبط نوع التمدد الذي نرصده، وبما يتضمن أنه إذا كانت المجرات تتزايد تباعدًا بمرور الوقت فلا بد إذن أنها كانت أكثر تقاربًا في الماضي؛ وأنه منذ زمن بعيد لا بد أن كل مادة الكون كانت تتكدس في كرة نار كثيفة. أدى ضم النظرية والأرصاد معًا إلى أن أصبحت فكرة الانفجار الكبير تفرض نفسها إلى حد بعيد، أتت في ستينيات القرن العشرين أدلة حاسمة تدعم الفكرة وذلك مع اكتشاف هسيس ضعيف من تشوش في أشعة الراديو، إشعاع خلفية الكون، الذي يأتي من كل الاتجاهات في الفضاء ويفسَر بأنه الإشعاع المتخلف عن الانفجار الكبير نفسه. وجود إشعاع الخلفية هذا تم التنبؤ به من النظرية قبل أن يرصَد، مثله في ذلك مثل تمدد الكون. بحلول نهاية القرن العشرين، أدى ضم النظرية مع الأرصاد إلى إثبات أن الزمن الذي مر منذ حدث الانفجار الكبير يقرب من ١٤ مليار سنة، وأن هناك مئات الملايين من المجرات مثل

مجرتنا مبعثرة عبر الكون المتمدد. السؤال الذي يواجهه علماء الكونيات الآن هو كيف حدث الانفجار الكبير نفسه — أو إذا شئت كيف بدأ الكون؟

نقطة البداية لمواجهة هذا السؤال هي النموذج المعياري الخاص بعالِم الكونيات نفسه، النموذج الذي يؤلف بين كل شيء عرفناه حول الكون المتمدد وبين الفهم النظري للزمان والمكان المدمجين في نظرية أينشتاين العامة. ساعد على ترسيخ هذا النموذج حقيقة أننا كلما نظرنا للكون، زاد ما عرفناه عن الماضي. الضوء ينتقل بسرعة محددة، ولهذا السبب فإننا عندما ننظر إلى مجرات بعيدة بملايين من السنين الضوئية، سنراها كما كانت منذ ملايين السنين، وذلك عندما تركها الضوء الذي يصل الآن إلى تلسكوباتنا. يستطيع علماء الفلك الآن باستخدام التلسكوبات القوية أن يروا ما كان الكون يبدو عليه وهو صغير العمر — ويتيح لنا إشعاع خلفية الكون أن «نرى» (بواسطة تلسكوبات الراديو) المرحلة الأخيرة من كرة النار نفسها.

لو تخيلنا أننا نلف زنبرك تمدد الكون إلى الوراء، فإنه فيما يبدو لا بد أن يكون هناك وقت كان فيه كل شيء مكدس في نقطة واحدة ذات كثافة لانهائية، تسمى المفردة.[1] هذه الصورة الساذجة لمولد الكون تدعمها نظرية النسبية العامة التي تقول إن الكون لا بد له حقًّا من أن «يولد» في مفردة. ولكن الفيزيائيين كما سبق أن ذكرنا لا يرتاحون إلى فكرة المفردات واللانهائيات، ويرون عادة أن أي نظرية تتنبأ بوجودهما في العالم الفيزيقي تكون خطأ. وهذا أمر يصدق حتى على النظرية العامة. تستطيع هذه النظرية أن تنبئنا بأن الكون كما نعرفه قد انبثق من حالة «تقرب» من أن تكون بكثافة لانهائية، ولكنها لا تستطيع أن تنبئنا بما حدث فعلًا عند البداية، عند لحظة الانفجار الكبير نفسها.[2] يستطيع النموذج المعياري لعلم الكون أن ينبئنا بأن هذه اللحظة حدثت منذ ما يقرب من ١٤ مليار سنة، ويستطيع أن يصف كل شيء حدث بعد تلك اللحظة. نستطيع أن

---

[1] المفردة: حسب النسبية العامة بدأ الكون بمفردة الانفجار الكبير حيث الضغط والحرارة يكونان بالغي الشدة في نقطة تنهار عندها نظريات الفيزياء المعروفة. (المترجم)

[2] سأستخدم مصطلح «الانفجار الكبير» للإشارة أيضًا إلى لحظة الميلاد هذه، وإن كان المصطلح إذا تحرينا الدقة في كلامنا يشير إلى مرحلة كرة النار الساخنة التي تلت ذلك بلحظات قليلة.

نعين اللحظة التي تنهار عندها النظرية العامة بأنها زمنيًّا نقطة الصفر، ثم نحسب منها قدمًا الزمن في وصف تطور الكون.

أقصى ما رأيناه وراء للآن هو أصل إشعاع الخلفية، وهو يناظر زمنًا يعقب لحظة الانفجار الكبير بمئات قليلة من آلاف السنين، عندما كان الكون كله ممتلئًا بغاز ساخن (يعرف اصطلاحًا باسم البلازما[٢]) تبلغ درجة حرارته ما يماثل تقريبًا حرارة سطح الشمس الآن، أي أنها آلاف قليلة من درجات سلسيوس. في ذلك الوقت كان حجم الكون هو فقط جزء واحد من الألف من الحجم الحالي لكل الكون المرئي الآن، ولم يكن هناك أشياء منفردة بمقياس النجوم أو المجرات موجودة في خضم الاضطراب الهائل للمادة الساخنة. إلا أنه يمكن الآن رصد فروق ضئيلة في درجة حرارة إشعاع الخلفية عند مواضع مختلفة في السماء، وتنبئنا هذه الأوجه من عدم التناسق (اللاتناسقات) بأمور عن حجم وطبيعة ما وجد من عدم التناسق في الكون عند نهاية مرحلة كرة النار. بالتحرك قدمًا من ذلك الوقت، نجد أن اللاتناسقات التي تُرصد في إشعاع الخلفية هي بالضبط بالقدر والنمط المناسبين لتفسير أصل المجرات ومجموعات المجرات — فهي البذور التي تنامت منها البنية التي نراها الآن للكون (سنذكر المزيد عن ذلك في الفصول الآتية). إذا انتقلنا للوراء من ذلك الزمن، نجد أن نمط اللاتناسقات التي تستطيع الآن رؤيتها في إشعاع الخلفية تنبئنا عن أنواع اللاتناسقات التي كانت موجودة عندما كان عمر الكون أصغر، عند الوقت الذي تنهار عنده النظرية العامة نفسها.

أول وأهم شيء حول هذه اللاتناسقات في إشعاع الخلفية هو أن حجمها ضئيل. فهي بالغة الصغر حتى إنه كان من المستحيل قياسها في أول الأمر، وكان الإشعاع يبدو آتيًا في اتساق كامل من كل الاتجاهات في الفضاء. لو كان الإشعاع متسقًا اتساقًا «كاملًا»، لانهار النموذج المعياري كله بدءًا، ذلك لأنه لو لم تكن هناك لاتناسقات في كرة نار الانفجار الكبير، لما وجدت البذور التي يمكن أن تنمو المجرات منها، وما كنا نحن سنوجد هنا. حقيقة

---

[٢] البلازما في الفيزياء مرحلة من تأين عالٍ للغازات يتساوى فيها تقريبا عدد الأيونات الموجبة (البروتونات) مع الأيونات السالبة (الإلكترونات). (المترجم)

أن الناس موجودون هنا وهناك ويتحيرون حول هذه الأسئلة هي حقيقة تنبئ علماء الفلك بأنه لا بد من وجود لاتناسقات في إشعاع الخلفية، وإنما هم ينقصهم فقط إنشاء أجهزة حساسة بما يكفي لقياسها، ولكن ذلك لم يحدث إلا في أوائل تسعينيات القرن العشرين، أي بعد مرور ما يقرب من ثلاثين سنة على اكتشاف إشعاع الخلفية، وذلك عندما تمكن قمر ناسا الصناعي المسمى «كوب»[4] من صنع القياسات الحساسة اللازمة لإظهار أن هناك حقًّا تموجات ضئيلة في إشعاع الخلفية. هناك سؤالان مهمان يفرضهما هذا الاكتشاف وهما: لماذا يكون إشعاع الخلفية قريبًا جدًّا من أن يكون ناعمًا سلسًا؟ ثم ما الذي صنع التموجات؟

السؤال الأول أعمق مما قد يظنه القارئ، لأنه حتى في وقتنا الحالي، بعد مرور ١٤ مليار سنة على الانفجار الكبير، لا يزال الكون قريبًا جدًّا من أن يكون ناعمًا. لن يكون هذا واضحًا عند مقارنة التباين بين لمعان مجرة مثل مجرتنا درب التبانة مع ظلام الفضاء ما بين المجرات، إلا أنه سرعان ما يصبح واضحًا بالمقاييس الأكبر. الكون ليس متسقًا اتساقًا «مضبوطًا»، ولكنه حتى بلغة من توزيع مجراته يكون متسقًا بالطريقة نفسها التي يبدو بها اتساق رغيف خبز بالزبيب بعد خبزه خبزًا متقنًا إلى حد الكمال — لن تكون هناك شريحتان من الخبز فيهما بالضبط النمط نفسه من الزبيب، ولكن أي شريحة ستبدو مماثلة كثيرًا لأي شريحة أخرى. بالطريقة نفسها إذا أخذت صورة فوتوغرافية للمجرات التي يمكن رؤيتها في رقعة صغيرة من السماء، فستبدو مماثلة كثيرًا لصورة رقعة بالحجم نفسه في جزء مختلف من السماء. بل إن إشعاع الخلفية هو أكثر اتساقًا، ويبدو متماثلًا بالضبط في كل أجزاء السماء بما لا يختلف إلا في نطاق كسر ١ في المائة. يكمن عمق هذه الملاحظة في حقيقة أنه لم يمر منذ الانفجار الكبير الوقتُ الكافي لأن تتفاعل كل أجزاء الكون المختلفة أحدها مع الآخر لتنعيمها لتصبح ملساء.

[4] كوب (COBE): قمر صناعي لناسا لاستكشاف الخلفية الكونية، والكلمة كوب اختصار الكلمات الإنجليزية التي تعني مستكشف الخلفية الكونية Cosmic Background Explorer. (المترجم)

إذا أخذنا أكثر الأمثلة تطرفًا، فإن إشعاع الخلفية من جانب من السماء قد انتقل طيلة ١٤ مليار سنة ليصلنا، والإشعاع من الجانب الآخر قد انتقل أيضًا طيلة ١٤ مليار سنة ليصلنا، إلا أن كلا الإشعاعين يكاد يكون لهما درجة الحرارة نفسها بالضبط. بما أن هذا الإشعاع (الكهرومغناطيسي) ينتقل بسرعة الضوء، ولا شيء يستطيع أن ينتقل بأسرع من الضوء، فإنه، كما يبدو، لا توجد أي طريقة يمكن بها للجانبين المتقابلين من السماء أن «يعرفا» درجة الحرارة التي ينبغي أن يكونا عليها حتى يؤكدا هذا الاتساق. يبدو وكأن هناك مؤامرة كبرى تنفذ لتجعل كرة النار الكونية متماثلة في كل مكان، حتى وإن كانت الأجزاء المختلفة من كرة النار لا يمكن أن يتفاعل أحدها مع الآخر.

لهذا التجانس علاقة بملمح محير آخر للكون، وهو أنه مسطح. تنبئنا نظرية النسبية العامة بأن المكان (أو إذا تحرينا الدقة في كلامنا فهو الزمكان) يمكن أن ينحني ويتشوه بوجود المادة. هذا التشوه في الزمكان ينتج عنه محليًا، بالقرب من جرم كالشمس أو الأرض، تأثير نسميه بالجاذبية. من وجهة نظر كونية، نجد في الفضاء بين النجوم والمجرات أن التأثير المجمع لكل مادة الكون يستطيع أن ينتج منحنى تدريجيًا في المكان بإحدى طريقتين.

إذا كانت كثافة الكون أكبر من قدر معين (يسمى الكثافة الحرجة) فإن المكان ذا الأبعاد الثلاثة لا بد أن ينحني على نفسه بالطريقة التي ينحني بها سطح الكرة ذو البعدين، ليصنع سطحًا مغلقًا. ليس من المهم بأي قدر تتجاوز تلك الكثافة مقدار الكثافة الحرجة، المهم فحسب أنها تتجاوزه فعلًا. هذا المكان متناهٍ ولكنه بلا حدود مثل سطح الأرض. سطح الأرض له مساحة متناهية، ولكنك تستطيع أن تواصل السير عليه في أي اتجاه لأي زمن نشاء دون أن نصل إلى أي حرف — فستجد أنك لا غير تواصل السير لتدور وتدور حول الأرض. إذا كان الكون بمثل ذلك، فلا بد أن يكون له حجم متناهٍ، ولكنك إذا واصلت التحرك في أي اتجاه فلن تصل أبدًا إلى أي حرف، وإن كنت (في النهاية) ستعود إلى حيث بدأت.

الاحتمال الآخر هو أن تكون الكثافة أقل من الكثافة الحرجة. ولا يهم هنا القدر الذي تكون به الكثافة أقل من الحرجة، المهم فقط أنها أقل.

يكون الكون في هذه الحالة «مفتوحًا» والمكان منحنيًا إلى الخارج، بطريقة مثل شكل السرج أو ممر في جبل، ولكن هذا يستمر إلى الأبد. سيكون مثل هذا الكون كبيرًا إلى ما لانهاية، وتستطيع أن تواصل السير فيه في خط مستقيم إلى لأبد بدون أن تزور قط النقطة نفسها مرتين.

يوجد بالضبط بين الاثنين حالة فريدة، حالة ما يسمى بالكون المسطح. سيكون لهذا الكون الكثافة الحرجة بالضبط، ويكون المكان مرادفًا بثلاثة أبعاد للسطح المسطح.

هذه الإمكانات الثلاثة تقابل ثلاثة إمكانات مختلفة لمصير الكون. في الكون المغلق نجد أن التأثير الجذبوي لكل خامة الكون سيؤدي تدريجيًا إلى إيقاف تمدده، وإلى أن يجعله يعود متقلصًا إلى كرة نار تذكرنا بالانفجار الكبير (أحيانًا يسمى هذا بالانسحاق الكبير). إذا كان الكون مفتوحًا، فسوف يتمدد إلى الأبد ولا يتوقف أبدًا عن ذلك. أما إذا كانت كثافة الكون هي الكثافة الحرجة بالضبط، فإنه سوف يتمدد بمعدل أبطأ وأبطأ (وذلك باستثناء واحد سنصل إليه لاحقًا) حتى يحدث في المستقبل البعيد تمامًا أنه سيحوم في وضع معلق، لا هو تمدد ولا هو تقلص، وإنما هو توازن على حرف سكين جذبوي.

بحلول منتصف سبعينيات القرن العشرين أصبح واضحًا من أرصاد الكون المتمدد أننا إذا عرّفنا قيمة الكثافة الحرجة بأنها تساوي الواحد، فإن قيمة كثافة الكون الواقعي تقع في مكان ما بين ٠,١ و١,٥ بما يجعلها قريبة جدًا من الكثافة الخاصة «الوحيدة» التي تسمح بها النظرية العامة. في هذا ما يثير حيرة بالغة، لأنه في ذلك الوقت لم يكن هناك سبب للاعتقاد بأن الكون يمكن أن يكون قد انبثق من الانفجار الكبير بدون أي كثافة على الإطلاق، ولكن حتى يصبح اللغز المحير أكثر عمقًا أدرك علماء الفلك وقتها أن تمدد الكون يجبره دائمًا على أن «يبتعد» عن الكثافة الحرجة بمرور الوقت، والكون المغلق يصبح «أكثر انغلاقًا» والكون المفتوح يصبح «أكثر انفتاحا» وهو يتمدد. حقيقة أن الكثافة التي تلاحظ حاليًا قريبة جدًّا من الواحد تعني أنه بعد الانفجار الكبير بثانية واحدة لا غير لا بد أن الكثافة كانت في نطاق جزء واحد من ١٠^١٥ (أي جزء واحد من

مليون المليار) من الواحد. فهي بين مقدار ٠,٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩ ومقدار ١,٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠١ التفسير الوحيد فيما يبدو هو أن لا بد أن هناك شيئًا يؤكد أن الكون بدأ وكثافته «بالضبط» الكثافة الحرجة، وأن الكثافة ما زال مقدارها هو ١ بالضبط، وذلك حسب ما تكونه هذه الوحدات الآن. ولكن ما الذي يمكن أن يكون قد أجبر الكون على هذا الاتجاه للاتساق والتسطح لحظة ميلاده؟

نستطيع باستخدام معادلات النسبية العامة أن نشق طريقنا إلى الوراء في الزمن ابتداء من مرحلة كرة النار للكون لنحسب ما كانت عليه درجة الحرارة بالكثافة في الكون في أوقاته المبكرة. ينبئنا بأنه بعد مرور جزء واحد من عشرة آلاف من الثانية ($١٠^{-٤}$ ثانية) عقب لحظة الانفجار الكبير كانت كثافة الكون تصل إلى كثافة نواة إحدى الذرات حاليًّا ($١٠^{١٤}$ جرام للسنتيمتر المكعب) ودرجة حرارته $١٠^{١٢}$ كلفن (١٠٠٠ مليار درجة). استمرت دراسة نوى الذرات مائة سنة، وكما رأينا في الفصل الثاني، دُرست أحوال كهذه في معجلات الجسيمات طيلة عقود من السنين. الفيزيائيون متأكدون من أنهم يفهمون ما يحدث لمادة كل يوم تحت هذه الظروف وتحت كل الظروف الأقل تطرفًا التي نشأت أثناء تمدد الكون واقترابه من تلك الحالة. هكذا فنحن الآن واثقون من أننا نعرف ما حدث من تطور لمادة كل يوم ابتداء من الوقت الذي تلا الانفجار الكبير بزمن $١٠^{-١٤}$ ثانية وما تلا بعده.

سنناقش بعض تفاصيل ذلك لاحقًا، ما يهم الآن هو أن النعومة والتسطح البالغ للكون، وكذلك اللاتناسقات البالغة الصغر التي تنامت لتصبح التجمعات العنقودية للمجرات، كلاهما معًا لا بد أنهما كانا مطبوعين من قبل في الكون في ذلك الوقت، لأنه لا يوجد ميكانزم يمكن أن يفرضهما في وقت بعدها. يعني هذا أن الحسابات يجب أن تمتد إلى الوراء في الزمان إلى مدى أبعد، في ظروف من الحرارة (الطاقة) والكثافة، ولكنها ليست مفهومة جيدًا مثل المادة النووية. نحن «نعتقد» أننا نعرف ما حدث في أوقات هي حتى أكثر تبكيرًا، ولكن هذه أبحاث ما زالت تجرى. كلما امتدت هذه الحسابات إلى زمن أقرب من لحظة الانفجار الكبير، أصبحت أكثر تخمينًا.

نجد في النهاية، أن نظرية النسبية العامة تنهار ولا يمكن استخدامها بعد ذلك. يحدث هذا عند النقطة التي تسود فيها فيزياء الكم، حيث نجد أن فكرة الزمكان المتصل بنعومة وسلاسة (ملاءة المطاط المطوطة)، هذه الفكرة التي في صميم القلب من النظرية العامة نفسها، نجد أنها تنهار. حسب نظرية الكم، يكون المكان والزمان أنفسهما كمّين، ولا معنى لأن نتحدث حول أي مسافة أقصر من $١٠^{-٣٥}$ من الأمتار (وهي المسافة التي تسمى «طول بلانك») أو أن نتحدث عن أي وقت أقصر من $١٠^{-٤٣}$ من الثواني («زمن بلانك»). إذن لم يكن هناك وجود لمفردة (بطول صفر، عند الزمن صفر)، وينبغي أن نتصور الكون المرصود كله على أنه «ولد» بعرض $١٠^{-٣٥}$ من الأمتار، وبكثافة $١٠^{٩٤}$ جرام للسنتيمتر المكعب، و«بعمر» $١٠^{-٤٣}$ من الثواني. ليس هناك في هذا السياق أي معنى للحديث عن أزمنة أكثر تبكيرًا، أو أطوال أكثر قصرًا، أو كثافات أكثر شدة.

يعتمد ما نعتقد أنه حدث بعد ذلك اعتمادًا كبيرًا على نظريات التوحيد الكبرى. تتنبأ النظريات التي وصفناها في الفصل الثاني بأنه عندما وُلد الكون كانت كل قوى الطبيعة في منزلة وطيدة متساوية، ولكنها سرعان ما انفصلت متباعدة إحداها عن الأخرى. وبينما هي تفعل ذلك دفعت بالكون دفعة قوية عنيفة أدت إلى تنعيمه وتسطيحه في عملية تسمى التضخم أو الانتفاخ، بينما تركت النوع المناسب بالضبط من التموجات ليفسر أوجه عدم التناسق في إشعاع الخلفية وما يوجد حاليًا من مجموعات المجرات العنقودية.

العملية التي انفصلت بها قوى الطبيعة متباعدة إحداها عن الأخرى أثناء انخفاض حرارة الكون عملية مشابهة لما يسمى بالطور الانتقالي، مثل طور ما يحدث عندما يتجمد الماء إلى ثلج. أثناء الطور الانتقالي يتم تبادل الطاقة بين المنظومة التي تتغير والعالم ككل. مثال ذلك، أن الثلج وهو عند درجة الصفر المئوية، وهو يذوب، يبقى عند درجة الصفر كل الوقت الذي يذوب فيه، حتى وهو محاط بمادة أدفأ ويمتص الطاقة. تتجه كل الطاقة التي يمتصها الثلج إلى تذويب الثلج، وليس إلى زيادة حرارته. عندما يتجمد الماء، تنعكس هذه العملية. الماء عند درجة الصفر المئوية يبقى عند هذه

الدرجة وهو يتجمد، حتى وإن كان العالم خارجه أبرد. الحرارة — التي تعرف بالحرارة الكامنة — تنطلق من الماء وهو يتجمد، وهذه الحرارة الكامنة نفسها هي التي يجب استعادتها إذا كنا نريد أن نذيب الثلج. بل إن هناك انطلاقًا لقدر أكبر من الحرارة الكامنة عندما يتكثف بخار الماء إلى ماء سائل، والحرارة المنطلقة عن طريق هذه العملية عند تكوين قطرات المطر تدفع تيار الحمل الحراري الذي يبني سحب الرعد. حدث في الكون المبكر جدًّا نوع من تيار حمل فائق. انفصلت الجاذبية عن القوى الأخرى عند زمن بلانك، عند $١٠^{-٤٣}$ ثانية، وانفصلت القوة النووية القوية عند ما يقرب من $١٠^{-٣٥}$ ثانية. هذان الطوران الانتقاليان قد أطلقا معًا مقدارًا هائلًا من الطاقة جعل الكون يتمدد تمددًا أسيًّا لكسر من الثانية. إلا أن كل ما تطلبه التضخم ليؤدي عمله هو هذا الكسر من الثانية.

هناك تشبيه بارع لهذه العملية. دعنا نتخيل بحيرة عالية في منطقة جبلية جليدية، معزولة وراء حائط سد من الجليد. قد تكون البحيرة مليئة بماء عميق في حالة توازن، لا يذهب إلى أي مكان. يقال عن هذا الماء باللغة العلمية أنه يشغل أدنى حد موضعي من حيث الطاقة المصاحبة للمجال الجذبوي للأرض. ولكن هذا الاستقرار الهادئ يخفي وراءه حقيقة أن الماء في البحيرة يختزن قدرًا كبيرًا من طاقة الوضع الجذبوية، بحيث إنه بأحد المعاني يكون هذا حدًّا أدنى زائفًا، إذا تمكن الماء من الخروج من البحيرة فسوف يتدفق سريعًا منحدرًا إلى البحر، الذي يمثل حدًّا أدنى حقيقيًّا (على الأقل بمدى ما يختص بسطح الأرض). دعنا نتخيل الآن أنه قد حدث تغير في المناخ، أو حتى مجرد التغير الموسمي من الشتاء إلى الصيف. يذوب السد الجليدي، وينطلق ماء البحيرة متدفقًا أسفل جانب الجبل في سيل جارف، ليصل في النهاية إلى البحر ويستقر في توازن مرة أخرى، ولكن ذلك على مستوى طاقة أقل. يصف الفيزيائيون الأحوال في الكون قبل التضخم بأنها توازن زائف من حيث الطاقة المصاحبة للفراغ (طاقة المكان «أو الفضاء» الخاوي، أو إن شئت الزمكان الخاوي). تنطلق «طاقة الفراغ» هذه أثناء طور الانتقال الذي يسوق التضخم، وبينما الكون يستقر في الحالة الحقيقية للحد الأدنى من طاقة الفراغ. التضخم نفسه يماثل سيل المياه الجارف

الذي يندفع من أحد مستويات الطاقة إلى الآخر، حدث قصير العمر بين حالتين مختلفتين من التوازن.

في حالة التضخم يكون هذا الحدث قصير العمر «جدًّا». لم يستمر التضخم إلا لما يقرب من ١٠-٣٢ ثانية، إلا أنه أثناء الوقت زاد حجم الشيء الذي سيكون فيما بعد الكون المرئي زيادة بمقدار الضعف لكل ١٠-٣٤ ثانية (تطرح بعض نسخ من النظرية معدل نمو أسرع حتى من ذلك، ولكن هذا فيه الكفاية لما نحتاجه). بكلمات أخرى، في ذلك الوقت الذي يبلغ ١٠-٣٢ ثانية حدث على الأقل مائة تضاعف (أي ١٠٢، لأن ٣٤ – ٣٢ تساوي ٢). كان في هذا التضاعف الكفاية لأن يدفع حجمًا يبلغ بالضبط ١٠-٢٠ مرة من حجم البروتون فيجعله يتضخم لكرة عرضها حوالي ١٠ سنتيمترات، بما يقرب من حجم ثمرة الليمون الهندي. هذا يرادف أن تجعل جسمًا في حجم كرة تنس يتضخم إلى حجم الكون القابل للرصد الآن خلال الوقت نفسه، أي خلال ١٠-٣٢ ثانية. توضح هذه المقارنة إحدى خصائص هذا التضخم وهي أنه بأحد المعاني يجري بما هو أسرع من الضوء. الضوء يستغرق ٣ × ١٠-١٠ من الثانية ليجتاز حيزًا عرضه سنتيمترًا واحدًا، أما التضخم فإنه يجعل الكون يتمدد من حجم أصغر كثيرًا من البروتون إلى كرة عرضها ١٠ سنتيمترات فيما يقرب من ١٠-٣٢ ثانية. السبب في أن هذا أمر ممكن هو أن المكان نفسه هو الذي يتمدد — فلا شيء هنا ينتقل «خلال المكان» بهذه السرعة. وهذا هو السبب في أن الكون بالغ الاتساق هكذا. أي شيء نستطيع رؤيته قد أتى من بذرة طاقة بالغة الصغر حتى أنه لم يكن هناك متسع داخلها لوجود أي لاتناسقات لها قدرها، وأدى التضخم إلى تجميد هذا الاتساق الأصلي في ثمرة الليمون الهندي الكونية التي استقرت على تمدد أكثر ثباتًا، يعتمد على كمية الحركة المتخلفة من التضخم، أثناء تشتت الطاقة من الأطوار الانتقالية.

يفسر التضخم أيضًا السبب في أن الكون بالغ التسطح. عند مط الأشياء (حتى وإن كان هذا المط للزمكان) فإن المط ينحو إلى تنعيم التغضنات والانحناءات. دعنا نتذكر هنا برقوقة مغضنة تنتفخ وهي مغمورة في الماء لتصبح كرة ناعمة. أو دعنا ننظر أمر الأرض، التي تبدو بالفعل لأي شخص

يعيش من فوقها مسطحة إلى حد بعيد، ثم لنتخيل أنها تمددت إلى حجم المنظومة الشمسية. سيكون من الصعب جدًّا أن نعرف أننا نعيش فوق سطح كرة لو كان كوكب الأرض كبيرًا هكذا. سواء كانت بذرة الكون مغلقة أو مفتوحة، فإن التضخم يدفعها إلى الاقتراب من التسطح إلى حد بعيد بحيث إنه بعد مائة تضاعف في الحجم أو أكثر سيكون من المستحيل على أي آلة يمكن لنا ابتكارها الآن أن تقيس الانحرافات البسيطة عن التسطح.

كان في هذا انتصار لنظرية التضخم، على أنه أيضًا عندما طرح التضخم لأول مرة في أوائل ثمانينيات القرن العشرين كان فيه نوع من الإرباك. بدا الأمر ممتازًا بأكثر مما ينبغي. في ذلك الوقت كان علماء الفلك، لأسباب سنعرضها لاحقًا، يعتقدون أن كثافة الكون تقرب من عُشر واحد من الكثافة الحرجة. ولكن التضخم يتنبأ بأن كثافة الكون ينبغي أن تكون قريبة قربًا وثيقًا من الكثافة الحرجة اللازمة للتسطح بحيث يكاد لا يمكن التمييز بينهما. إما أن هناك بعض خطأ في فكرة التضخم، وإما أن هناك ولا بد مادة في الكون بقدر أكبر كثيرًا مما حسبه علماء الفلك في أوائل ثمانينيات القرن العشرين. كان رد الفعل الطبيعي في أول الأمر أن التضخم، ذلك الوافد الجديد، لا بد أن يكون خطأ. إلا أنه أُجريت دراسات تتزايد تعقدًا ورقيًّا على إشعاع الخلفية وصلت إلى ذروتها بالأرصاد التي أجريت بواسطة قمر ناسا الصناعي «وماب WMAP»[٥] في أوائل القرن الحادي والعشرين، وتبع ذلك بقليل أرصاد «مستكشف بلانك Plank Explorer» لوكالة الفضاء الأوروبية ESA، وبينت كل هذه الدراسات والأرصاد أن الكون حقيقة قريب قربًا وثيقًا من التسطح على نحو يكاد لا يمكن تمييزه، ومن ثم فإن كثافته لا بد أن تكون قريبة قربًا وثيقًا من الكثافة الحرجة بحيث يكاد لا يمكن التمييز بينهما. خلَّف هذا لغزًا هو السؤال عن أين تكون الكتلة «المفتقدة» (التي تسمى أحيانًا المادة المظلمة،[٦] لأنها لم تتم رؤيتها قط)؛ حل هذا اللغز يشكل موضوع الفصل السادس.

---

[٥] وماب WMAP: اختصار مسبار ويلكنسون لتباين خواص الميكروويف Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. (المترجم)

[٦] المادة المظلمة: مادة لا ترى وتعرف بتأثيرها الجذبوي الذي يبقى على المجرات متماسكة، وهي تشكل معظم الكون، وهناك عدة نظريات أو تخمينات عما يمكن أن تتكون منه المادة المظلمة. (المترجم)

نظرية التضخم لا تزال بحثًا جاريًا، وكما هو الحال مع النظريات الموحدة الكبرى هناك تنويعات مختلفة على اللحن. إلا أن ما أحرزته النظرية عمومًا من نجاحات، خاصة تنبؤها الناجح بأنه عند إنشاء أجهزة دقيقة دقة كافية سنجد أن الكون مسطح بالضبط، هذه النجاحات تنبئنا بأن ثمة شيء حقيقي أساسًا بشأن مفهوم التضخم، حتى وإن كنا لا نعرف أي نسخة من النظرية هي التي ستخرج منتصرة في النهاية (هذا إن كانت أيًّا من النسخ الحالية). من بين النجاحات الأخرى للنظرية أنها تنبئنا أيضًا عن من أين أتت اللاتناسقات البالغة الصغر التي تنامت لتصبح مجموعات مجرات عنقودية، وتشير في الوقت نفسه إلى وجود ميكانزم ممكن لأصل الكون نفسه. لهذا الميكانزم علاقة بالتراوحات الكمومية للفراغ التي لاقيناها فيما سبق.

عدم اليقين الكمومي يعني أنه بالمقاييس الصغرى لا يمكن للكون أن يكون ناعمًا ومتناسقًا إلى حد الكمال. لا بد دائمًا من وجود لاتناسقات بالغة الصغر تكون تقريبًا بمقياس طول بلانك، وهي تقفز للوجود ثم تختفي ثانية. هذه التراوحات الكمومية تأثيرها قليل حاليًّا في عالمنا اليومي، على الأقل بمقاييس الطول البشرية (على الرغم من أنها ربما تكون مهمة في فهم طبيعة القوة التي تعمل بين الجسيمات المشحونة كهربائيًّا مثل الإلكترونات والبروتونات، ومن ثم فإنها بهذا المعنى لها علاقة أكيدة بحياتنا اليومية). إلا أن علماء الكونيات أدركوا أن هذه التراوحات لا بد أنها كانت تجرى في وقت التضخم نفسه. هذه التراوحات، بدءًا من الوقت الذي كان فيه حجم ما يعرف الآن بأنه كل الكون المرئي حجمًا أكبر من طول بلانك بما يقرب من مائة مليون مِثْل، ستكون قد امتطت بالتضخم، قبل أن تستطيع أن ترفرف لتخرج من الوجود، ولتشكل عند نهاية التضخم شبكة من اللاتناسقات تملأ الكون وهو في حجم ثمرة الليمون الهندي. هذه اللاتناسقات ستنطبع على الكون وتظل باقية خلال كل طور كرة النار، وتمتط مع تمدد الكون، مستمرة طول الوقت، طيلة القليل من مئات الآلاف من السنين بعد الانفجار الكبير، وعندما يبرد الكون إلى درجة حرارة سطح الشمس حاليًّا ويتخذ إشعاع خلفية الكون طريقه عبر الكون. تصنع نظرية الكم تنبؤات مضبوطة عن نوع أنماط اللاتناسقات التي تنتج بواسطة هذه العملية، ومن الوجهة

الإحصائية فإن هذا يماثل تمامًا كلًّا من نمط اللاتناسقات التي نراها في إشعاع الخلفية نفسه وكذلك نمط اللاتناسقات في توزيع المجرات عبر السماء كما نراه بالمقاييس الكبرى. هذا نصر رائع آخر لنظرية التضخم – فهي تتنبأ بأن الكون سيكون قريبًا جدًّا من أن يكون ناعمًا إلى حد كامل، ولكنه سيحتوي على أنواع اللاتناسقات المطلوبة لنمو المجرات أثناء تمدد الكون. وهي تعني أن أكبر اللاتناسقات في الكون (التجمعات العنقودية الفائقة للمجرات) يرجع أصلها إلى أصغر ما يمكن من لاتناسقات يمكن أن توجد، أي التراوحات الكمومية للفراغ.

الحقيقة أن الكون كله يمكن أن يكون قد تنامى من تراوح كمومي للفراغ، والفضل في ذلك يرجع إلى توليفة من التضخم وخاصية غريبة للجاذبية.

هذه الخاصية الغريبة للجاذبية هي أنها تختزن طاقة «سلبية». عندما يسقط شيء ما (أي شيء!) في مجال جذبوي (مثل الماء الذي يندفع من الجبل كما وصفنا فيما سبق) تنطلق طاقة. تأتي هذه الطاقة من المجال الجذبوي. عندما يكون أحد الأشياء (وهو في هذه الحالة الماء) مرتفعًا عاليًا تكون لديه طاقة وضع أكثر مما لديه وهو منخفض بأسفل. الفرق بين هذين المستويين من الطاقة يفسر لنا من أين تأتي الطاقة التي تجعل الماء يتحرك. ولكن أين سنقيس مستويات الطاقة؟ قوة الجاذبية بين جسمين تتناسب مع كسر من الواحد مقسومًا على مربع المسافة بينهما. ومن ثم فإن هذه القوة تكون صفرًا عندما يكون الجسمان منفصلين باللانهاية، لأن الواحد مقسومًا على ما لانهاية يكون صفرًا (ناهيك عن أن تكون ما لانهاية مربعة). حسب الصورة عند أينشتاين، يكون هذا مرادفًا للقول بأن التأثير الجذبوي لأحد الأشياء يختفي عند اللانهاية لأن الزمكان عند اللانهاية لا يتشوه مطلقًا بكتلة الجسم. يعني هذا في كلا الحالين أن الطاقة المصاحبة لأحد الأجسام في المجال الجذبوي تكون صفرًا عندما يكون الجسم بعيدًا إلى مالانهاية عن مصدر المجال. ولكننا رأينا من قبل أنه عندما يتحرك جسم إلى أسفل في مجال جذبوي (أي عندما يزداد قربًا من مصدر المجال) فإنه يكتسب طاقة من المجال ويحولها إلى طاقة حركة (الماء يندفع أسفل جانب

الجبل، أو قدح يسقط من يدك، أو أي شيء يهوي تحت تأثير الجاذبية). تأتي هذه الطاقة من المجال الجذبوي نفسه. يبدأ المجال بطاقة من صفر، ويعطي طاقة للجسم الساقط، بحيث إنه لا بد أن المجال نفسه سيخلِّف بطاقة سلبية. يصدق هذا حرفيا، فليس فيه بعض حيلة من المعادلات، حيث إنه لا يوجد لدينا أي خيار بشأن المكان الذي نقيس منه نقطة الطاقة الصفر للمجال. ولكن ما هي علاقة ذلك بتراوحات الكم؟

من حيث المبدأ، ليس هناك حدود لمقدار ما يمكن أن يكون لدى تراوح كمومي من الكتلة (أو إذا تحرينا الدقة في كلامنا فسنقول الكتلة-الطاقة، عندما نبقي في ذهننا المعادلة $E = mc^2$)، على أنه كلما زاد ما للتراوح من كتلة (أو زادت طاقته)، قل احتمال حدوثه. في أوائل سبعينيات القرن العشرين أوضح إد تيرون عالم الكونيات الأمريكي أنه من حيث المبدأ يمكن أن ينشأ عن لاشيء تراوح كمومي يحوي الكتلة-الطاقة لكل الكون المرئي، وأنه على الرغم من أن الكتلة-الطاقة لهذا التراوح ستكون بمقدار هائل، فإنه في الظروف المناسبة سيكون هناك ما يوازن ذلك بالضبط من الطاقة السلبية الجذبوية للمجال الجذبوي التي تصاحب كل هذه الكتلة، بحيث إن إجمالي طاقة التراوح يكون صفرًا.

بدا وقتها أن هذه حيلة رياضية لا معنى لها، لأن من «الواضح» أن كيانًا كموميًّا بالغ الصغر ومع مجال جذبوي قوى هكذا لن يستطيع أبدًا أن يتمدد، وسوف يموت خارجًا بنفسه من الوجود بمجرد أن يظهر. على أنه بعد ذلك بعشر سنوات ظهر أن التضخم، وهو يعد بأكثر من طريقة نوعًا من تأثير مضاد للجاذبية، يطرح طريقة يمكن بها لتراوح كمومي يحوي طاقة كافية لصنع كل مادة الكون أن يكون قد تضخم إلى حجم ثمرة ليمون هندي مع تخلف فضالة من تمدد إلى الخارج قبل أن تجد الجاذبية الوقت الكافي للقضاء على وجوده. هناك تعبير أشاعه آلان جوث المنظر الرائد للتضخم، يقول فيه إن الكون الذي يمكن أن يظهر خارجًا من لاشيء سيكون بمثابة «وجبة الغذاء المجانية النهائية». يتفق أن الظروف المناسبة للجاذبية حتى توازن المادة على هذا النحو بلغة من الطاقة هي ظروف تتضمن مطلبًا أساسيًّا بأن يكون الكون مغلقًا، بالمعنى الذي وصفناه من

قبل، وإن كان من المسموح به أن يكون قريبًا قربًا وثيقًا من أن يكون كونًا مسطحًا — بحيث يكاد لا يمكن التمييز بين هذين النمطين. ويتفق هذا كله مع ما يلاحظ عن الكون الذي نعيش فيه.

تنقّلنا حتى الآن بين عوالم التخمين العلمي، وإن كان لا يزال تخمينًا جديرًا بالاحترام. على أن من المستحيل أن نتوقف ها هنا، ذلك أن هذه الأفكار تتفادى الإجابة عن سؤال هو: إذا كان الكون قد بدأ فعلًا بهذه الطريقة، من أين أتى التراوح الكمومي الأصلي نفسه؟ يوجد حاليًّا عدد كبير من الاقتراحات المطروحة للإجابة عن هذا السؤال يكاد يكون مساويًا لعدد ما يوجد من علماء الكونيات، ويمكن أن يكون أي منها إجابة صحيحة، أو أن ذلك ليس ممكنًا لأي منها. على أني بروح من توفير بعض التبصرات حول الأمور التي ما زلنا «لا» نعرفها، سأطرح هنا التخمين المفضل عندي شخصيًّا، وهو التخمين الذي أخذ ينال الآن أكبر انتباه من الخبراء.

الفكرة الأثيرة عندي شخصيًّا (وهي فكرة تأتي هي نفسها بأشكال كثيرة مختلفة) هي أن نوع التراوح الكمي الذي أدى إلى ولادة كوننا هو نوع قد يحدث الآن في أي مكان من كوننا. لا يعني هذا أن هناك كرة نار بحجم ثمرة الليمون الهندي تتمدد بعنف متفجرة إلى الخارج في مكان ما من زمكاننا، ذلك أنه وإن كان من الممكن أن تبدأ هذه العملية في كوننا (وربما يقدح زنادها انهيار نجم كبير الكتلة ليتقلص إلى ثقب أسود) إلا أن هذه الكرة ستتمدد عند ذاك داخل مجموعة أبعادها الخاصة بها، وكلها تتعامد بزاوية قائمة على كل أبعاد كوننا. يتضمن ذلك بالطبع، أن كوننا قد وُلد (أو برز كبرعم) على هذا النحو من زمكان كون آخر، وأنه لم تكن هناك أي بداية، ولن تكون هناك نهاية، وهناك فحسب بحر لانهائي من أكوان فقاعية تتصل فيما بينها. بل من الممكن قبل أن يمر زمن طويل — ربما خلال مائة سنة أو ما يقرب — أن يكون لدينا فيما يحتمل القدرة التكنولوجية على تخليق أكوان بهذه الطريقة، وأن كوننا ربما يكون قد تخلق عن عمد بواسطة كائنات ذكية في كون آخر، كنوع ما لإحدى التجارب. على أنه يكفينا هنا مدى انطلاقنا هكذا بهذه التخمينات.[٧]

---

[٧] للمزيد من هذه الأفكار انظر كتابنا «في البداية»، وكتاب لي سمولين «حياة الكون». (المؤلف)

الفكرة الأكثر إثارة وسخونة التي تناقش حاليًا في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، لتفسر مولد الكون، هي فكرة بدأت من أفكار الأوتار والأغشية التي نوقشت في الفصل الثاني. هناك تنويع معين على هذا اللحن يصوّر كوننا على أنه كيان بعشرة أبعاد كلها متدامجة، فيما عدا ثلاثة أبعاد للمكان. وبعد واحد للزمان، وهي تتدامج بأن تكون ملفوفة في حجم بالغ الصغر حتى إننا لا نستطيع الكشف عنها مباشرة. الكون كله يمكن أن يكون غشاءً يطفو فيما حوله في بعد هو البعد الحادي عشر، بطريقة تماثل أنه يمكن تحريك صفحة ورق ذات بعدين فيما حولها في البعد الثالث للمكان. من الممكن أن يوجد الكثير من هذه الأكوان الأغشية وهي تتشارك في البعد الحادي عشر، مثلما يمكن أن تكون هناك صفحات كثيرة أسطحها ذات بعدين موجودة كلها في كتاب ضخم بثلاثة أبعاد. هذه الأكوان هي مثل صفحات الكتاب يمكن أن يكون كل منها قريب جدًا من الآخر. عندما توضع صفحتان من الورق إحداهما فوق الأخرى، تكون كل نقطة في إحدى الصفحتين مجاورة لنقطة على الصفحة الأخرى، وبالطريقة نفسها فإن كل نقطة في المكان في كوننا ذي الأبعاد الثلاثة قد تكون بجوار نقطة في كون آخر بثلاثة أبعاد ولا تبعد عنا إلا بمسافة ضئيلة للغاية في البعد الحادي عشر. الكون المجاور لنا قد يكون بعيدًا عنا بمسافة هي فحسب كسر من الملليمتر، بما يماثل قرب ملابسنا الداخلية من جلدنا، ولكن ذلك يكون باتجاه يجعل من المستحيل علينا أن نراه وأن نتصل به. الواقع أن الكون المجاور لنا هو بأحد المعاني أقرب حتى من ذلك، لأنه لا يقتصر على أن يحيط بنا وكأنه جِلد ثانٍ لنا — وإنما نجد أن كل نقطة في المكان «ذي الأبعاد الثلاثة»، بما في ذلك النقاط «في الداخل» من أجسادنا، كلها تقع بجوار نقطة في الكون الآخر.

إحدى طرق استيعاب ذلك، هي أن نعود إلى فكرة الكون المسطح مثل صفحة مسطحة ذات بعدين، ولكنها الآن تقطنها مخلوقات ذات بعدين في أشكال هندسية مثل المربعات، والمثلثات، وما إلى ذلك. هذه الكائنات هي حرفيًا ذات بعدين، وليس لديها أي طريقة لإدراك أي مما يجري في البعد الثالث، بعيدًا عن الورقة. ما بداخل الكائن الرباعي الأبعاد يرادف ما

بداخل جسدك في أبعاده الثلاثة، وإذا كان هناك كائن ثلاثي الأبعاد لديه من الوحشية ما يكفي لأن تجعله يقتحم وينقب في داخل الكائن الرباعي الأبعاد فإن هذا الكائن الرباعي الأبعاد سيحس ألمًا داخليًا هو في الظاهر بلا سبب. إذا اقتربت كرة ذات ثلاثة أبعاد من هذا العالم الثنائي الأبعاد ومرت ببطء من خلاله، فإن القاطنين في الأرض المسطحة سيرون أولًا إحدى النقط عندما يلمس قطب الكرة المستوى الذي يعيشون فيه. مع استمرار تحرك الكرة، تصبح هذه النقطة دائرة تظل تتنامى حتى يصل خط استواء الكرة إلى ذلك المستوى، ثم تنكمش ثانية وهي تبتعد، لتختفي في النهاية عند نقطة عندما يكمل القطب الآخر للكرة مروره خلال ذلك المستوى.

ولكن ماذا سيحدث إذا اقترب كون آخر مسطح بالكامل من الأرض المسطحة ولمسها؟ يعتمد الأمر لا غير على الطريقة التي نبني بها المعادلات، وحسب هذه المعادلات يمكن للكونين أن يمر أحدهما من خلال الآخر بدون أي تأثير، أو أنهما يمكن أن يتفاعلا عنيفًا. إذا امتددنا بهذه الصورة إلى أكوان بثلاثة أبعاد (يضاف إليها بعد واحد للزمان وأبعاد عديدة متدامجة) تتحرك في البعد الحادي عشر، وطبقنا القيود المختلفة على المعادلات التي عرفناها من البحث عن نظرية كل شيء، سنجد أنه عندما يصطدم معًا بهذه الطريقة كونان خاويان وتقريبًا خاملان، فإن هذا الحدث يمكن أن يقدح زناد نوع من التفجر الكمومي، هو بالضبط نوع التفجر الذي يتحول بمساعدة من التضخم إلى كون يماثل كوننا. من الممكن أن يكون الموقف أكثر تعقدًا (ومن ثم أكثر إثارة للاهتمام) لأنه بداية لا حاجة بالكونين لأن يكونا مسطحين بالضبط — ولنتخيل لذلك صفحتين من الورق قد ضغطتا لتتغضنا ثم بسطتا لتكونا تقريبًا ناعمتين، واقتربتا بعدها إحداهما من الأخرى، فسوف نرى أن هناك نقطًا مختلفة على السطحين ستتلامس قبل أن يصل معظم العالمين إلى التلامس. وبالطبع، فإنه لا حاجة مطلقًا بزمكاني الكونين لأن يكونا مسطحين بالطريقة التي وصفناها، فيمكن لهما أن يكونا منحنيين، مثل سطح كرة، أو في شكل حلزون حلقي مثل كعكة الدونت doughnut، أو في أشكال أخرى شيقة. يعطي هذا كله مجالًا للكثير من التخمين عند منظرى نظرية إم حول الطريقة التي ربما بدأ بها الكون

الذي نعيش فيه. ما لم يظهر سبب يجعلنا نعتقد أن أحد هذه التنويعات على اللحن له صلة بالواقع (هذا إن ظهر ذلك بأي حال) فإنه ليس هناك أهمية كبيرة لأن نتوسع في تفاصيل تلك التخمينات خارج هذه الدوائر المتخصصة. على أن إحدى أبسط هذه الأفكار توفر بالتأكيد زادًا للفكر، وتبين أنه ربما يكون هناك بعض أهمية لمناقشة ما حدث قبل الانفجار الكبير.

نجد في نسخ كثيرة من نظرية إم أن الجاذبية هي وحدها من بين القوى الأربع للطبيعة التي تمتد خارجة من كوننا وللداخل من البعد الحادي عشر. هذه أفكار جاذبة للانتباه من وجهة النظر الفيزيائية لأنها يمكن أن تفسر السبب في أن الجاذبية أضعف كثيرًا من القوى الأخرى — السبب هو بأحد المعاني، أن معظم تأثير الجاذبية يتسرب بعيدًا عن عالمنا ذي الأبعاد الثلاثة. في استطاعتنا أن نصنع لذلك مشابهة غير دقيقة وإن كانت مفيدة، فنشبه الأمر بلوح معدني من بعدين معلق في خزان ماء. لو ضربنا اللوح بمطرقة، فسوف تتردد أصداء موجات الصوت من خلال اللوح، إلا أن بعض الطاقة في الموجات ستتسرب بعيدًا في شكل موجات صوت تنتقل خلال البعد الثالث في الماء. ومن ثم ستكون هناك طاقة أقل في اللوح نفسه.

وفقًا لبعض نماذج نظرية إم (نموذج يسمى «كون التفجر الناري»[8] ekpyrotic universe، وسيعود للظهور لاحقًا في قصتنا)، إذا حدث لكونين خاويين بثلاثة أبعاد يطفوان في البعد الحادي عشر أن اقترب أحدهما من الآخر فسوف تشدهما الجاذبية معًا ليصطدما. سيؤدي هذا إلى أن يقدح زناد أحداث في كلا الكونين تماثل انفجارنا الكبير، إلا أن انطلاق الطاقة سيؤدي أيضًا إلى أن يرتد الكونان ويتباعدا، فيأخذان في الانحراف منفصلين في البعد الحادي عشر. بينما ينجرف الكونان في البعد الحادي عشر فإن كلًّا منهما يتمدد في الأبعاد الثلاثة الخاصة به، وتُبسط المادة وهي تتزايد أبدًا ليشبه الحال ما كان عليه الكونان قبل اصطدامهما. على أنه يحدث في

---

[8] كون التفجر الناري: مصطلح يرجع إلى المذهب الرواقي الإغريقي ويشير إلى نموذج يتخلق الكون فيه من تفجر نيران مفاجئ بما يشبه اصطدام كونين في نموذج نظرية إم. (المترجم)

النهاية أن تتغلب الجاذبية على هذا الانجراف وتشد الكونين معًا مرة أخرى، لتقدح زناد مجموعة أخرى من الانفجارات الكبيرة والارتدادات، وهلم جرًّا إلى مالانهاية. سوف نناقش هذه الفكرة لأبعد من ذلك في الفصل العاشر.

سنجد أن هذه الأفكار، مثل الكثير من الأفكار التي يناقشها علماء الكونيات في محاولتهم لأن يفهموا من أين أتى الانفجار الكبير، هي أفكار تتضمن أن كوننا ليس بالكون الفريد، وأن انفجارنا الكبير ليس بالفريد. إلا أن ذلك قد يتصف بأحد المعاني بالخصوصية. قد يكون هناك عدد لانهائي من الأكوان الأخرى بجوار كوننا، وربما يكون هناك، أو سيكون هناك فيما بعد عدد لانهائي من الانفجارت الكبيرة يمتد معًا إلى الوراء وإلى الأمام في الزمان. إلا أنه من غير المرجح أنها كلها تتماثل تمامًا. بعض الأكوان قد تتمدد فقط مسافة صغيرة بعد انفجارها الكبير لتعود إلى التقلص ثانية، وبعضها قد يتمدد بسرعة بالغة حتى إن المادة تنبسط بسمك رقيق للغاية لا يسمح أبدًا بتكوين المجرات، والنجوم، والبشر. من الممكن إلى حد بعيد في أكوان أخرى أن يكون لقوى الطبيعة درجات من الشدة تختلف عن شدة القوى في كوننا، بحيث تجرى التفاعلات النووية بسرعة أقل، أو بسرعة أكبر، ويحدث بطريقة أو أخرى ألا توجد قط أي فرصة لتكوين نوع الجزيئات المركبة التي تصنع أجسادنا.

تحير الناس زمنًا طويلًا من حقيقة أن كوننا يبدو بطرائق كثيرة مناسبًا بالضبط لانبثاق وتطور الحياة. يحاج البعض بأن الكون قد صُمم من أجل وجود الحياة، وهي فكرة تكتسب بعض جدارتها من أن هناك إمكانية لأن يكون الكون قد تم تخليقه كتجربة معملية أُجريت في كون آخر (إلا أنه عندئذ، كيف تأتى أن كان ذلك الكون مناسبًا بالضبط لأن يتيح انبثاق حياة ذكية؟). على أن هناك آخرين قد طرحوا أنه مع وجود عدد لانهائي من الأكوان فإن أي توليفة ممكنة من قوانين الفيزياء وقوى الطبيعة لا بد أن توجد في مكان ما، أو في وقت ما. سيكون معظم هذه المصفوفة اللانهائية من الأكوان، أكوانًا عقيمة، لأن الظروف التفصيلية المطلوبة للحياة لا توجد فيها. إلا أن بعض هذه الأكوان سيكون، بالصدفة، مناسبًا في الحقيقة مناسبة مضبوطة للحياة، بالطريقة نفسها التي كانت بها عصيدة

الدب الصغير مناسبة للفتاة ذات الشعر الذهبي[9] (Goldilocks)، حتى وإن لم تكن العصيدة قد صنعت أصلًا من أجلها. أشكال الحياة المماثلة لحياتنا ستوجد فقط في أكوان تكون الظروف فيها مناسبة للحياة، ومن ثم ليس هناك مفاجأة في أن نجد أن كوننا ملائمًا ملاءمة بالغة لنا نحن أنفسنا. سنجد أيضًا كجزء من طبيعة اللانهائيات أنه مع وجود عدد لانهائي من العوالم يتم الاختيار منها، فإنه على الرغم من أن نوعنا من العالم ربما يكون نادرًا جدًّا، فإنه حتى الكسر الصغير من اللانهاية يكون نفسه لانهائيًّا، وهذا يجعل أمرنا أمرًا خاصًّا، وإن لم يكن بالغ الخصوصية. إذا كانت هذه الأفكار صحيحة، فلا بد إذن من وجود عدد لانهائي من هذه الأكوان من نوع أكوان الفتاة ذات الشعر الذهبي حيث توجد أشكال للحياة تماثل أشكال حياتنا. الأمر هكذا يشبه الاختلاف بين أن يكون لديك حُلة حيكت على مقاسك، فهي حلة فريدة، وبين أن تختار حلة من فوق مشجب للملابس الجاهزة في متجر. إذا كان هناك أنواع لانهائية من الحلل بكل ما يمكن من الأشكال والأحجام لتختار واحدة منها، فلن يكون هناك أي داع لأن تحاك لك حلة، ذلك أنه لا بد أن تكون هناك حلة بين الحلل الجاهزة تلائم مقاسك على أكمل وجه وهي جاهزة في انتظارك مثل تلك العصيدة.

على أنه في أي من الحالين هناك حقيقة أننا نعيش في كون توجد فيه قوانين معينة للطبيعة مفهومة تقريبًا فهمًا جيدًا، وتوجد فيه أربع قوى للطبيعة لها خصائص تمت دراستها على أفضل وجه. وإذا تركنا جانبًا الجدل والتنازع حول ما جرى قبل الانفجار الكبير، فإننا نعرف ما كان عليه الكون بعد جزء من الثانية من لحظة مولده، عند نهاية التضخم، عندما كان في حجم ثمرة الليمون الهندي، وقد رسمت عليه خطوط مما يتفجر من اللاتناسقات الكمومية، وهو ساخن جدًّا ولا يزال يتمدد سريعًا وإن كانت الجاذبية قد بدأت في التو في العمل على إبطاء هذا التمدد. السؤال التالي لذلك هو: كيف تنامى الكون المبكر من كرة النار تلك؟

---

[9] الفتاة ذات الشعر الذهبي: شخصية رئيسية في قصة في الأدب الشعبي الإنجليزي. دخلت هذه الفتاة الصغيرة كوخ أسرة من الدببة أثناء غياب أفرادها عنه، وجربت أطعمة وأثاث أفراد الأسرة، فلم يلائمها ما يخص الدب الأب والدبة الأم، أما ما لاءمها بالضبط فهو طعام وأثاث الدب الصغير مثلها. وبنفس المنوال فإن ظروف البيئة في بعض الأكوان قد تكون ملائمة بالضبط للحياة. (المترجم)

الفصل الرابع

كيف تطور الكون في بداياته؟

ربما تكون العلميات التي دفعت بالتضخم هي نفسها المسئولة عن إنتاج المادة التي تشكل في كوننا الحالي النجوم والكواكب ونحن أنفسنا. معظم كتلة هذه المادة المعتادة اليومية تكون في شكل بروتونات ونيوترونات (تعرف إجمالًا بالباريونات) تتكون هي نفسها من كواركات. المكوّن الآخر المهم للمادة المعتادة اليومية هو عائلة اللبتون التي يسيطر عليها الآن الإلكترونات وجسيمات النيوترينو. على أنه بسبب الإسهام الغالب للباريونات في كتلة الكون المرئي، فإن المادة المعتادة اليومية يشار إليها غالبًا وببساطة على أنها مادة باريونية. البذرة التي تنامى منها كوننا كانت كرة نار من طاقة خالصة، ذات سخونة وكثافة هائلتين. السؤال هنا هو: كيف نشأ عن هذه الكرة النارية أثناء تمدد الكون وابترادە، هذا النوع من المادة الباريونية التي نراها حولنا في كل مكان؟ أو هو إذا شئت: من أين أتت الكواركات واللبتونات؟ نحن نعتقد أننا نعرف الإجابة، وإن كان تفسيرنا هذا كما هو الحال دائمًا تفسيرًا يتزايد فيه التخمين كلما نظرنا إلى الوراء في الزمان لمدى أبعد وكلما زاد ارتفاع الطاقات التي ننظر أمرها.

درجات التخمين المختلفة التي يتطلبها الأمر يمكن قياسها بمقارنة كثافة طاقة الكون المبكر في الأوقات المختلفة، ويتم حسابها بأن نلف زنبركًا يرصد تمدد الكون (مثلما نلف عقارب الساعة إلى الوراء للأوقات السابقة) وذلك وفقًا لمعادلات نظرية النسبية العامة، وننظر في ظروف كثافات الطاقة (أو متوسط الطاقة لكل جسيم) التي تم التوصل إليها عبر السنين في الأجيال المختلفة من معجلات الجسيمات. تقاس هذه الطاقات كما هو معتاد بوحدات

الإلكترون فولت، وهناك علامة قياس مفيدة توضع في الذهن، وهي أن كتلة البروتون الواحد تقل بالكاد عن جيجا إلكترون فولت GeV الواحد وهو يساوي ألف مليون إلكترون فولت، وهذا يقابل ١,٧ × ١٠^-٢٧ كيلو. نستطيع أيضًا إجراء مقارنات بين كثافة الكون في العهود المختلفة وكثافة الماء، التي يبلغ مقدارها جرامًا واحدًا لكل سنتيمتر مكعب.

هناك وقت ملائم لإنهاء القصة التي تُروى في هذا الفصل، وذلك بعد الانفجار الكبير ببضع مئات آلاف من السنين، عندما بردت حرارة الكون إلى ما هو أقل من حرارة سطح الشمس الآن (تقريبًا عند ٦٠٠٠ كلفن، أو مجرد نصف إلكترون فولت) وحيث نجد أن الإشعاع الذي كُشف عنه الآن كخلفية الكون الميكروويفية قد بدأ ينساب بحرية خلال الفضاء.[١] في ذلك الوقت كانت كثافة الكون ١٠^-١٩ فحسب من كثافة الماء (عُشر واحد من جزء من مليار المليار)، ولا يوجد أي شك في أننا نفهم سلوك المادة في هذه الظروف. لم يكن هناك بالطبع أي «أيام» أو «أسابيع» أو «سنوات» في ذلك الوقت الذي يسبق بزمن طويل وجود الأرض أو أي كوكب، ولكننا عندما نعالج هذه الوحدات ببساطة كأدوات قياس للزمن، يناظر كل منها عددًا معينًا من الثواني، فإننا نستطيع أن نقول في ثقة إنه بعد الانفجار الكبير بسنة كان مقدار درجة حرارة الكون مليوني كلفن، وإن كانت كثافته لا تزال أقل من جزء من المليار من كثافة الماء. بعد الانفجار الكبير بأسبوع كان الكون بأسره عند درجة حرارة ١٧ مليون كلفن، أي أكثر سخونة من مركز الشمس الآن بنسبة تقرب من ١٠ في المائة، وعلى الرغم من أن الكثافة كانت فحسب جزءًا واحدًا من المليون من كثافة الماء، إلا أن الضغط في كرة النار كان أكثر من مليار مثل لضغط الجو عند سطح الأرض الآن.

تأتي بنا علامة الطريق التالية إلى ظروف تماثل تلك التي سبرها أول سيكلوترون (معجل دائري) بني في أوائل ثلاثينيات القرن العشرين. بعد الانفجار الكبير بمائتي ثانية (ما يزيد قليلًا عن ثلاث دقائق)، كان

---

[١] درجات الحرارة في مقياس كلفن تقاس بدرجات يماثل حجم الدرجة منها حجم الدرجة على مقياس سلسيوس المألوف، ولكن تدريج كلفن يبدأ من الصفر المطلق عند درجة حرارة –٢٧٣°م. الاختصار في مقياس كلفن يكون ك وليس °ك. ومن ثم فإن ٢٧٣ ك تساوي صفر درجة مئوية، وهكذا دواليك.

متوسط الطاقة لكل جسيم في الكون هو ٨٠٠٠٠ إلكترون فولت (٨٠ كيلو إلكترون فولت)، بما يساوي درجة حرارة أقل بالكاد من مليار كلفن. ظل العلماء لما يزيد عن سبعين سنة يجرون تجارب تتضمن على الأقل ما يساوي ذلك من طاقة لكل جسيم، ولهذا السبب نحن واثقون من أننا نفهم تفاعلات الجسيمات التي كانت تجرى وقتذاك — بل نفهمها في الحقيقة في أوقات تسبق ذلك كثيرًا. بعد ثانية واحدة من الانفجار الكبير، كانت حرارة الكون تقريبًا ١٠ مليار كلفن (ما يقرب من مليون إلكترون فولت)، وكانت الظروف في كل مكان تشبه الظروف عند قلب نجم يتفجر، هو ما يعرف الآن بالسوبرنوفا. كانت كثافة المادة قدرها ٥٠٠٠٠٠ ضعف كثافة الماء، وكان الضغط يعادل $١٠^{٢١}$ ضعف الضغط الجوي على الأرض حاليًّا. آخر علامة طريق تبقينا على اتصال بالمادة المعتادة اليومية في شكلها الحالي تقع عند زمن مقداره $١٠^{-٤}$ من الثواني (جزء واحد من عشرة آلاف جزء من الثانية)، بعد الانفجار الكبير (وقت الصفر)، عندما كانت كثافة الكون تساوي تقريبًا كثافة نواة ذرية حاليًّا، ودرجة الحرارة تقرب من ألف مليار كلفن ($١٠^{١٢}$ كلفن أو حوالي ٩٠ مليون إلكترون فولت، أو ٩٠ ميجا إلكترون فولت). هذه ظروف مفهومة تمامًا، واستمرت كذلك زمنًا طويلًا، حتى إن قصة الكون منذ ذلك الوقت وما بعده، قصة النموذج المعياري للانفجار الكبير، كانت قد رسخت تمامًا بحلول نهاية ستينيات القرن العشرين.

بل حتى قبل ذلك، كانت معجلات الجسيمات العاملة في خمسينيات وستينيات القرن العشرين قد وصلت طاقاتها إلى عدة وحدات من الجيجا إلكترون فولت، تقابل درجات حرارة (بقدر ما يكون لهذا المفهوم من معنى عند هذه الطاقات المرتفعة) تزيد عن ٣٠×١٠^{١٢} كلفن.[٢] وُجدت هذه الظروف في الكون عند وقت يقرب من ٣×١٠^{-٨} من الثواني بعد وقت الصفر (أي عند ٣٠ جزء من المليار من الثانية بعد وقت الصفر). في ثمانينيات القرن العشرين نجد أن أحد المعجلات المسمى تيفاترون في فيرميلاب قرب شيكاغو قد وصل إلى طاقة مقدارها ١٠٠٠ جيجا إلكترون

---

[٢] للمقارنة اعلم أن درجة الحرارة في مركز النجم تقل عن عُشر جيجا إلكترون فولت.

فولت وهو بهذا يعيد لشطر من الثانية الظروف التي وُجدت في الكون عندما كان عمره ٢ × ١٠-١٢ من الثانية لا غير. وفرت المعجلات من هذا النوع المُدخل التجريبي الذي استخدم في إنشاء نظريات فيزياء الجزيئات التي وُصفت في الفصل الأول. بل إن المنظرين تمكنوا من أن يستخدموا التخمين ليصلوا إلى أبعد من ذلك بأفكارهم عن النظريات الموحدة الكبرى، والسمترية الفائقة والأغشية، التي ربما توفر تبصرًا فيما حدث قبل أن يكون عمر الكون ١٠-١٢ من الثانية؛ الخطوة المباشرة التالية في اختبار هذه النظريات هنا على الأرض تحدث الآن في جنيف حيث يوجد معجل اصطدام الهادرون الكبير لمنظمة «سيرن» وقد بدأ تشغيله في التو. إذا سارت الأمور على ما يرام، فسيصل هذا الجهاز إلى طاقات تزيد عن ٧٠٠٠ جيجا إلكترون فولت، ليسبر الظروف التي وُجدت في الكون عند زمن ١٠-١٥ من الثانية بعد وقت الصفر. لا تزال هناك وثبة كبيرة تخمينية إلى الوراء من هذا الزمن حتى وقت ١٠-٣٩ من الثانية، ولكننا «نعتقد» أننا نعرف ماذا كان يجري وقتها، على الأقل في خطوطه الخارجية. وعلينا أن نبدأ قصتنا من هنا لنتحرك إلى الأمام في الزمان إذا أردنا أن نفهم من أين أتت المادة الباريونية.

تبدأ القصة بالنظريات الموحدة الكبرى وما فيها من بوزونات إكس، التي لها دورها في اضمحلال البروتون، هذا إذا كانت النماذج صحيحة. عند زمن ١٠-٣٩ من الثانية بعد وقت الصفر، كان متوسط مقدار الطاقة لكل جسيم هو ما يقرب من ١٠^١٦ جيجا إلكترون فولت ودرجة الحرارة هي ١٠^٢٩ كلفن. أما الكثافة فهي ١٠^٨٤ مثل كثافة الماء، وهو ما يقابل حشد ١٠^١٢ (ألف مليار) من النجوم مثل الشمس في حجم يساوي حجم بروتون واحد. هذه هي الظروف التي تُظهر فيها بوزونات إكس خصائصها.

عندما ذكرنا فيما سبق كيف تتخلق الجسيمات الافتراضية من الطاقة، مررنا مرًّا سريعًا عبر أحد المعالم المهمة في هذه العملية. هناك بعض خصائص للجسيمات، كالشحنة الكهربائية، يبدو أنه يتم الحفاظ عليها في الكون. عمومًا، لا يمكن خلق أو تدمير الشحنة الكهربائية في أي تجارب، ولا في أي عملية طبيعية تُلاحظ حاليًّا في الكون، ومن ثم فإنه يوجد دائمًا المقدار نفسه بالضبط من هذه الشحنة في العالم بمدى ما نعرف

(ويتفق أن هذا المقدار هو الصفر). إذا أردنا أن نصنع من الطاقة جسيمًا بشحنة سلبية، كالإلكترون، فسيكون علينا أيضًا أن نصنع جسيمًا بشحنة موجبة لتتوازن الحسابات. في هذه الحالة يكون الجسيم النظير للإلكترون والمشحون بشحنة موجبة هو ما يسمى بالبوزيترون، مضاد الإلكترون الذي لاقيناه فيما سبق، ولديه كتلة الإلكترون نفسها ولكنه يحمل وحدة واحدة من الشحنة الموجبة. وهكذا فإننا عندما تحدثنا عن سحابة من جسيمات افتراضية تحيط بشحنة، كنا نشير على نحو أكثر تحديدًا إلى مجموعة من أزواج الإلكترونات والبوزيترونات تندفع محتشدة حول الشحنة، وليس مجرد إلكترونات لا غير.

على أن الأمر لا يقتصر على اختلاف الشحنة الكهربائية للجسيمات والجسيمات المضادة. هناك خصائص كمومية أخرى للجسيمات يتم الحفاظ عليها بالطريقة نفسها، وكما أشرنا في الفصل الأول فإن من المعتقد أن كل نوع من جسيم موجود في العالم الآن له نظير من «جسيم مضاد» له كل الخصائص المضادة. لا يعني هذا أن كل جسيم فرد له زميل من جسيم مضاد، وإنما يعني أنه من حيث المبدأ من الممكن وجود هذا الجسيم المضاد إذا كان هناك طاقة متاحة لصنع الزوج المطلوب من الجسيم ومضاد الجسيم. الفوتون الذي يحوي طاقة كافية (أي يحوي أكثر من طاقة كتلة سكون لإلكترونين) يستطيع أن يحول نفسه إلى «زوج» من الجسيمات، إلكترون وبوزيترون. إلا أنه عندما يلتقي بوزيترون وإلكترون، فإنهما كلاهما يختفيان في نفثة من فوتونات عالية الطاقة — هي أشعة جاما — بينما خصائصهما الكمومية المتضادة تلغي إحداها الأخرى.

هناك عمليات مرادفة تؤثر في كل الجسيمات. من الممكن صنع أزواج جسيمات من المادة والمادة المضادة، تُصنع من طاقة خالصة، ولكن كلًا منها يبيد الآخر لتنطلق الطاقة مرة أخرى عندما يلتقي النظيران من الجسيم والجسيم المضاد. بل إن الجسيمات لا يلزم حتى أن تكون مشحونة كهربائيًا — هناك مثلًا نظير من مادة مضادة للنيوترون — إلا أن الشحنة هي أوضح اللافتات وأكثرها ملاءمة لتمييز كيانات المادة المضادة من نظائرها من المادة إذا كان يتفق فعلًا أنها مشحونة. (النيوترونات مصنوعة طبعًا من

الكواركات، ومضادات النيوترونات مصنوعة من مضادت كواركات، إلا أن هناك جسيمات كمومية متعادلة أصلًا لها أيضًا نظائر من المادة المضادة).

عندما وُلد الكون، كان في شكل طاقة خالصة. إلا أن هذه الطاقة أخذت في التو تصنع أزواجًا من الجسيمات ومضادات الجسيمات، وبدأت هذه الأزواج في التو يبيد أحدها الآخر لصنع الطاقة مرة أخرى. مع تمدد الكون وابترادہ انخفضت كمية الطاقة المتاحة في كل حيز بالغ الصغر في الكون، ومع انخفاض كثافة الطاقة أصبح من المستحيل صنع الجسيمات الأكبر كتلة. في النهاية نجد أن كثافة الطاقة (التي تساوي الحرارة) تنخفض إلى نقطة يستحيل عندها حتى صنع الإلكترونات. لو أن العمليات التي وصفناها إلى الآن كانت قابلة تمامًا للانعكاس، وهو ما كان يبدو عليه الأمر في كل التجارب تقريبًا التي تنفذ على الأرض، فستكون النتيجة هي كون صغير العمر يحوي عددًا متساويًا من جسيمات المادة والمادة المضادة، في الوقت الذي لا تزال فيه كثافته بالغة الارتفاع بحيث تتكرر كثيرًا الاصطدامات بين الجسيمات. سيكون هناك عندها لكل إلكترون أحد البوزيترونات، ولكل كوارك مضاد كوارك، وهلم جرًّا. سيحدث عندها أن يلاقي كل جسيم نظيره من الجسيم المضاد ليبيدا. بحلول الوقت الذي يكون عمر الكون من هذا النوع القليل من مئات الألوف من السنين، ستكون كل المادة قد حولت نفسها ثانية إلى إشعاع، على أن درجة حرارة الكون ستكون من الانخفاض بحيث لا يمكن خلق أي مزيد من أزواج الجسيمات. لن يكون في الكون عند ذاك أي مادة مطلقًا. وإذن، من أين أتت المادة التي صُنعنا نحن منها، والمادة التي تشكل كل النجوم والمجرات في الكون المرئي؟

الإجابة الوحيدة الممكنة أنه في الظروف التي وجدت مبكرًا في حياة الكون لم تكن العمليات التي وصفناها في التو عمليات فيها سمترية بالكامل. أول من أدرك ذلك إدراكًا تامًا، وأول من وضح نتائج ذلك بلغة بسيطة هو الفيزيائي الروسي أندريا ساخاروف في ستينيات القرن العشرين.

نقطة الانطلاق لما طرحه ساخاروف هي اكتشاف تجريبي اكتُشِف في أوائل ستينيات القرن العشرين كان فيه مفاجأة بالكامل لعالَم فيزياء الجسيمات. يتعلق هذا الاكتشاف بخاصية للجسيمات الكمومية سميت،

لأسباب تاريخية لا داعي للدخول في تفاصيلها هنا، بأنها «سمترية سي بي CP symmetry». أبسط طريقة للتوصل إلى صورة لما تدور بشأنه سمترية سي بي هي أن نتخيل تفاعلًا يشمل جسيمات كمومية، ثم نتخيل أننا نضع مكان كل جسيم الجسيم المضاد المناظر له «ثم» نعكس كل التفاعل في مرآة. وفقًا لسمترية سي بي، سيسلك عالم صورة المرآة بالطريقة نفسها بالضبط التي يسلك بها العالم الواقعي. على أنه أُجريت سلسلة طويلة من التجارب بدأت في ١٩٦٣، أجراها جيمس كرونين وفال فيتش بجامعة برينستون وتضمنت دراسات عن اضمحلال جسيمات تعرف باسم «ميزونات كيه K mesons (أو الكاونات Kaons) واكتشفا فيها أن هناك تقريبًا اضمحلالين اثنين من كل ألف يحدثان بطريقة تنتهك سمترية سي بي. هذه الاضمحلالات تشمل فقط التفاعل الضعيف، ولكنها تبين أن المبدأ العزيز عن سمترية تفاعلات الجسيمات — مضادات الجسيمات — ليس بالقانون المطلق للكون. شجع هذا ساخاروف على أن يطرح اقتراحًا في ١٩٦٧، بأنه لا بد أن هناك عمليات تشمل التفاعل القوي والباريونات تنتهك أيضًا سمترية تفاعلات الجسيمات — مضادات الجسيمات. إذا كان الأمر هكذا، فإنه يستطيع أن يضع رسمًا تخطيطيًا لطريقة يمكن بها للمادة الباريونية أن يتم إنتاجها في الكون المبكر جدًا.

نالت هذه الأفكار كلها دعمًا هائلًا في ٢٠٠٤، عندما أجريت تجربة اسمها «بابار BABAR» في مركز المعجل الخطي في ستانفورد بكاليفورنيا، (واختصاره «سلاك Slac Stanford Linear Accelerator Centre)، وقيست في هذه التجربة عمليات اضمحلال الجسيمات المعروفة باسم ميزونات بي والجسيمات المضادة المناظرة لها.[٣] لو أنه ليس هناك اختلاف في الطريقة التي تؤثر بها التفاعلات الأساسية في المادة والمادة المضادة، فسنجد أن نوعي الجسيمات سيضمحلان بالطريقة نفسها من وجهة النظر الإحصائية. إلا أنه بعد أن غربل الباحثون سجلات اضمحلال ٢٠٠ مليون زوج من ميزونات بي ومضاداتها، وجدوا أنه حدث في ٩١٠ مرة أن ميزون

[٣] من هنا يأتي اسم بابار حيث إن BABAR اختصار Betameson-antibody Bbar. (المترجم)

بي قد اضمحل إلى كاون وبيون، ولكن مضاد ميزون بي لم يضمحل بالطريقة نفسها إلا فقط في ٦٩٦ مرة. في تجارب الكاون الأصلية ظهر انتهاك سمترية سي بي بمعدل اضمحلالين فقط للألف، أو بنسبة ٠,٢ في المائة؛ أما في التجارب الجديدة، فإن الانتهاك يظهر بمستوى ١٣ في المائة (لأن إجمالي كل الاضمحلالات كان ١٦٠٦، مع اختلاف بين طريقتي الاضمحلال قدره ٢١٤ مرة، ٢١٤ تساوي ١٣,٣ في المائة من ١٦٠٦).[4] هذا حتى الآن هو أقوى الأدلة على صحة أفكار سخاروف عن طريقة انبثاق المادة من الانفجار الكبير.

عند إعادة النظر في الأمور، يبدو اقتراح ساخاروف بسيطًا للغاية حتى إنه يكاد يبدو كتحصيل حاصل فيه تكرار وحشو. إلا أنه تطلب طريقة مختلفة تمامًا للتفكير في الكون بحيث لم يكن هناك أي فرد آخر غيره في أواخر ستينيات القرن العشرين لديه من الخيال ما يجعله يدرك الأمر مثله. أولًا، قال ساخاروف إنه لا بد من وجود عمليات تجرى عند طاقات أكبر كثيرًا من تلك التي أُنجزت في تجارب المعجلات فوق الأرض (وهذا هو السبب في أننا لم نرها قط)، وهي عمليات تنتج عنها الباريونات من الطاقة (وذلك إزاء مضادات الباريونات). وثانيًا فإن البعض على الأقل من هذه العمليات لا بد أن ينتهك سمترية سي بي. لو لم يحدث ذلك، لكانت هناك عمليات مضادة تساوي ذلك وتصنع مضادات باريونات بالأعداد المناسبة بالضبط لإبادة الباريونات التي يتم صنعها في العملية الأولى. وثالثًا فإن الكون لا يمكن أن يكون في حالة توازن (أو يكون في الواقع في درجة الحرارة نفسها طول الوقت) وإلا فإن العمليات العكسية ستعيد المادة ثانية إلى إشعاع بالسرعة نفسها التي تحول بها الإشعاع إلى مادة، يعني هذا أنه لا بد أن الكون يبرد، وهذا بدوره يعني أنه لا بد يتمدد. تمدد الكون هو الذي يجعل من الممكن أن تتجمد المادة خارجة من الطاقة، بشرط أن يكون هناك عدم توازن ينتج عنه باريونات أكثر من مضادات الباريونات.

---

[4] مما تجدر ملاحظته، أن تجربة «بابار» وحدها، وهي مجرد جزء من الأبحاث التي تجرى في معجل «سلاك» شملت جهد ما يقرب من ٦٠٠ من العلماء والمهندسين من كندا، والصين، وفرنسا، وألمانيا، وإيطاليا، وهولندا، والنرويج، وروسيا، والمملكة المتحدة، والولايات المتحدة. لن نواصل ما يقال عن مهاجمة هذه النقطة، إلا أن فيها ما يؤكد أن طريقة أداء العلم الآن تكون كما سبق أن ذكرنا بالعمل في فريق وليس باتباع الأداء الفردي.

لم يهتم أحد اهتمامًا كبيرًا بأفكار ساخاروف وقتها، لأنه لم يكن هناك إطار تفصيلي لنظرية أو تجربة يمكن إسنادها إليه. إلا أنه مع نشأة النماذج التي وصفناها في الفصل الأول والثاني في سبعينيات القرن العشرين، طفت الفكرة ثانية في سياق النظريات الموحدة الكبرى، وخاصة العمليات التي تشمل بوزونات إكس التي تتضمن إمكان اضمحلال البروتون. يتضمن اضمحلال البروتون اختفاء باريونات من الكون، وتحول جسيمات المادة إلى طاقة. إذا تابعنا هذا السيناريو إلى الوراء، فسيكون لدينا صورة لظهور الباريونات في الكون خارجة من الطاقة.

هناك نوعان من الأدلة التي تجعلنا نعرف مقدار الطاقة الأولية في الكون التي تحولت إلى مادة باريونية. الأول هو ببساطة إجراء مقارنة بين مقدار المادة التي يمكن لنا أن نراها الآن في النجوم والمجرات وبين شدة إشعاع الخلفية، يملأ الإشعاع الفضاء في اتساق، ويمكن التعبير عن ذلك ككثافة للإشعاع، بلغة من عدد الفوتونات في كل سنتيمتر مكعب، أو في أي حجم نختار العمل به. المادة الباريونية تملأ الكون في اتساق أقل، ولكن لا يزال في الإمكان أن نأخذ كمية الكتلة النمطية لأحد النجوم، ونضربها في عدد النجوم في مجرة نمطية، ونحصي عدد المجرات في حجم مختار من الفضاء، ونحول هذا إلى كثافة للباريونات التي تكون لدينا إذا كانت المادة كلها تنبسط منتشرة في اتساق. كما سنرى في الفصل التالي، فإن القصة فيها ما يزيد قليلًا عن ذلك، لأن هناك أيضًا كمية يمكن قياسها من المادة الباريونية المظلمة المصاحبة للمجرات، إلا أن المبدأ مباشر تمامًا.

طريقة المقاربة الأخرى تعتمد على فهمنا لطريقة «طبخ» البروتونات والنيوترونات في المراحل اللاحقة من الانفجار الكبير، وسوف نناقش ذلك لاحقًا في هذا الفصل. لحسن الحظ أن المقاربتين كليهما تعطينا الإجابة نفسها عما يسمى أحيانًا نسبة الباريون للفوتون؛ هناك في الكون الآن باريون واحد لا غير لكل مليار (١٠⁹) من الفوتونات. (هذه الأرقام كلها بالطبع تقريبية، لن ينزعج أحد كثيرًا إذا بينت دراسات أدق أن النسبة أقل أو أعلى قليلًا من ذلك). هذا قياس لحجم الانحراف عن الكمال في عمليات الاضمحلال التي تشمل بوزونات إكس، وهو فقط جزء واحد من المليار.

تتنبأ كل النظريات الموحدة الكبرى بأنه سيكون هناك انحرافات كهذه عن السمترية، ولكن بعضها يتنبأ بقيم أكبر والبعض يتنبأ بقيم أصغر. أحد أول الانتصارات للزواج بين علم الكونيات وعلم فيزياء الجسيمات هو التخلص من كل النظريات الموحدة الكبرى التي لا تتنبأ على وجه التقريب بالنسبة الصحيحة بين الباريون والفوتون، وبوجه خاص فإن الحجم المضبوط لهذا الرقم يدعم بقوة النماذج التي تتضمن السمترية الفائقة.

هذا هو آخر جزء من الأدلة التي نحتاج إليها حتى نفسر الطريقة التي نتجت بها المادة التي نراها اليوم من الطاقة في الانفجار الكبير. يبدأ الأمر بأشياء «نظن» أننا نعرفها، اضمحلال بوزونات إكس، وينتهي بأشياء نحن واثقون من أننا «نعرفها»، وهي اندماج نوى الهيدروجين لصنع نوى الهيليوم في المراحل الأخيرة من كرة نار الانفجار الكبير بعد ذلك بدقيقتين.

يحدث في أول لحظات الانفجار الكبير أنه يتم باستمرار صنع جسيمات إكس ومضاداتها خارجة من الطاقة الخالصة بالطريقة المعتادة، ثم تأخذ في التو تقريبًا في التفاعل أحدها مع الآخر لتعود للاختفاء ثانية إلى طاقة. إلا أن كتلة جسيم إكس مقدارها ١٠^١٥ جيجا إلكترون فولت، وبعد مرور ١٠^-٣٥ من الثانية عقب ميلاد الكون تكون درجة الحرارة قد انخفضت بالفعل إلى أقل من المقدار الذي يمكن عنده صنع أزواج من جسيمات إكس ومضادتها. لا يزال هناك في ذلك الوقت الكثير من هذه الأزواج هنا وهناك، إلا أنه يوجد لكل جسيم إكس جسيم من مضاد إكس في مكان قريب منه. لو كانت كل جسيمات إكس ومضاد إكس الباقية في الوجود قد التقت بنظائرها وتمت إبادتها، لما كان هناك أي باريونات تتخلف من الانفجار الكبير لتصنع النجوم والكواكب والناس. ولكن النظريات الموحدة الكبرى تنبئنا بأن بوزونات إكس يمكن أن تضمحل بالطريقة المناسبة تمامًا، وذلك بفضل انتهاك سمترية سي بي وتمدد الكون، بحيث تخلف أثرًا من الكواركات واللبتونات. الحقيقة أنه بسبب الكتلة الكبيرة لجسيم إكس، فإن جسيم الإكس الواحد سيضمحل في وابل من الكواركات واللبتونات. على أنه حتى نبقي الأمور مبسطة فسوف نصف العملية الأساسية لا غير.

يمكن لجسيم إكس أن يتبع أيًا من مسارين اثنين للاضمحلال. في أحد هذين المسارين يتم إنتاج أزواج من الكوارك ومضاده، ويبيد كل منهما

الآخر، ولا يحدث أي مما يثير الاهتمام. في المسار الآخر تنتج أزواج تتكون من مضاد كوارك ولبتون، يمضى كل منهما في طريق مختلف. ولكن هذه ليست نهاية القصة. جسيمات مضاد إكس تضمحل أيضًا، وتتبع أيًا من المسارين المرادفين. فهي إما أن تنتج أزواجًا من الكوارك ومضاده وهذه لا تحتاج إلى مزيد من الحديث عنها، وإما أن تنتج أزواجًا كل منها من كوارك واحد ومضاد لبتون واحد؛ أي الضد لمنتجات اضمحلال إكس. مرة أخرى، وبفضل التمدد وابتراد الكون، نجد أن المنتجات النهائية لكل هذه الاضمحلالات تبقى متخلفة عندما يكون الكون أبرد من أن يصنع جسيمات إكس جديدة. هذا هو المغزى المهم لتبصر ساخاروف الخطير عن أهمية أن يكون الكون في حالة عدم اتزان.

لو كان ذلك هو كل ما يحدث، فسنجد بعد استهلاك كل جسيمات إكس، أن الجسيمات الناتجة عن اضمحلال إكس ستلتقي مع الجسيمات المضادة الناتجة عن اضمحلال مضاد إكس، والعكس بالعكس، وهكذا فإن المادة كلها سوف تتحول مرة ثانية إلى طاقة. ولكن انتهاك «سي بي» ينبئنا بأن المادة والمادة المضادة لا يسلكان دائمًا بالطريقة نفسها بالضبط. وبوجه خاص، فإن النماذج المؤسسة على الملاحظات عن انتهاك «سي بي» تنبئنا أنه عندما تضمحل كل جسيمات إكس ومضاد إكس فسوف يكون هناك مقدار من المادة أزيد قليلًا جدًا (جزء واحد من المليار) عما يوجد من المادة المضادة. ومن ثم فإنه عندما تكون كل أزواج المادة والمادة المضادة قد أباد أحدها الآخر، فسيظل أثر من المادة باقيًا في كون مليء بالإشعاع، وهذا الأثر، إذا اخترنا النموذج المناسب، يكون كافيًا بالضبط لأن يفسر ما نرصده من نسبة الباريون للفوتون. أحد الآمال الكبرى لفيزياء الجسيمات أن معجل اصطدام الهادرون الكبير والتجارب المصاحبة له، بما فيها تجارب المادة المضادة، قد يتمكن من إجراء المزيد لاختبار هذه الأفكار. إلا أننا لدينا بالفعل معلومات تكفي لأن نواصل البحث في المرحلة التالية من قصة تنامي الكون، مرحلة معالجة الكواركات لتدخل في تكوين الهيدروجين والهيليوم.

بحلول الوقت الذي تكون فيه جسيمات إكس قد اضمحلت، في زمن يقرب من 10^{-35} من الثانية بعد مولد الكون، نجد أن القوة القوية، مثلها

مثل الجاذبية، قد أصبحت كيانًا متميزًا على أنه مع الطاقات العالية التي لا تزال موجودة في الكون، لن يكون هناك تمييز بين التفاعل الكهرومغناطيسي والتفاعل الضعيف. يتحكم في سلوك الجسيمات ثلاثة تفاعلات (التفاعل القوي، والكهروضعيف، والجاذبية)، والجسيمات التي نعرف أنها تنقل التفاعل الضعيف، جسيمات دابليو وزد، يمكنها أن تطوف بحرية خلال الكون. لا تزال الكواركات (هي واللبتونات في الحقيقة) مما يمكن إنتاجه من الطاقة في أزواج من الجسيم ومضاد الجسيم، إلا أنه من الآن فصاعدًا سيكون هناك دائمًا فائض ضئيل من المادة يزيد عن المادة المضادة، متخلفًا عن اضمحلال جسيمات إكس. الكواركات «المفردة» لن تظل باقية في الوجود من ذلك العهد حتى وقتنا الحالي، ولكن إذا اتفق أن التقى أحد هذه الكواركات «الأصلية» مع مضاد كوارك «جديد» وأباده فإن هذا سيخلف الجسيم الزميل لمضاد الكوارك هذا وهو حر، ويستمر هذا عبر الأجيال أثناء تمدد الكون.

الكواركات نفسها ظهرت بخصائصها في زمن بعد البداية بما يقرب من ١٠^-١٠ من الثانية، عندما تنخفض حرارة الكون إلى أقل من مقدار ١٠٠ جيجا إلكترون فولت، وهو المقدار المطلوب لصنع أزواج من جسيمات دابليو وزد. من هذا الوقت فصاعدًا تتخذ جسيمات دابليو وزد دورها في حمل التفاعلات الضعيفة بين الجسيمات ولا يكون لها وجود مستقل إلا عند إنتاجها (ولزمن وجيز) في إحداث الطاقة المرتفعة التي تتضمن أن تحدث اصطدامات بين الجسيمات، هي إما تحدث طبيعيًّا أو في معجلات الجسيمات المصممة لهذا الغرض. بحلول هذا الوقت تكون قوى الطبيعة قد اتخذت أدوارها المألوفة ككيانات أربعة متميزة، وقد تمايزت الكهرومغناطيسية عن التفاعل الضعيف. المرحلة التالية من تنامي الكون تتناول بحرًا من كواركات ساخنة يتفاعل أحدها مع الآخر في حالة تُعرف بأنها بلازما الكوارك. هناك بعض تجارب المعجلات قد بدأت في التو في سبر نوع الظروف التي وجدت في الكون في زمن بعد البداية يقرب ما بين ١٠^-١٠ و١٠^-٤ من الثواني، وما يحدث هنا ليس مجرد سحق لجسيمات منفردة وإنما لحزم تحوي نوى عناصر ثقيلة كالذهب والرصاص تصطدم إحداها بالأخرى رأسًا برأس. حتى الآن لا يعرف إلا القليل عن سلوك بلازما الكوارك، على أن من

الواضح أنه عند زمن بعد البداية يقرب ما بين $١٠^{-٦}$ و$١٠^{-٣}$ من الثانية (أي عندما كان عمر الكون ما بين ميكرو ثانية واحد وملي ثانية واحد)، انخفضت درجة الحرارة إلى نقطة لا يكون فيها بعدُ لدى الكواركاتِ الطاقةُ الكافية لأن تطوف بحرية فيما حولها، وبدلًا من ذلك فإنها ترتبط معًا في ثنائيات وثلاثيات، بالطريقة التي توجد بها الآن. ابتداء من زمن بعد البداية بما يقرب من ميكرو ثانية واحد، عندما تنخفض الطاقة المتاحة إلى أقل من مئات قليلة من وحدات ميجا إلكترون فولت MeV، تلتحم الكواركات ومضادات الكواركات في باريونات ومضادات باريونات. نستطيع القول على وجه تقريبي إن مرحلة بلازما الكوارك قد انتهت بعد البداية بزمــن من $١٠^{-٤}$ من الثانية، من المؤكد أنه عندما وصل عمر الكون إلى ملي ثانية اختفت عندها كل الكواركات الحرة. ولا يزال هناك مقدار ضئيل من المادة يزيد عن مقدار المادة المضادة، مما وُرث عن اضمحلال جسيمات إكس ولكنه الآن يتمثل كزيادة ضئيلة في البروتونات عن مضادات البروتونات وزيادة ضئيلة في النيوترونات عن مضادات النيوترونات، ويبقى هذا موجودًا أثناء انتقال الكون أخيرًا إلى عهد أصبحت فيه هذه الباريونات مكونًا مهمًّا للمادة. تبيد معظم الباريونات مع نظائرها من المادة المضادة لينتج بحر من الفوتونات التي لا تزال تملأ الكون، ويبدأ باقي الباريونات العمليات التي تؤدي إلى وجودنا فيما يمكننا أن نسميه بالمرحلة الباريونية لوجود الكون.

يجدر بنا أن نتوقف هنا لحظة لنفكر في المقاييس الزمنية التي تعاملنا بها. عندما نتداول الحديث عن أرقام مثل $١٠^{-١٠}$ و$١٠^{-٣٥}$، يكون رد الفعل الطبيعي أن نرى أنهما كليهما رقمان غاية في الضآلة. إلا أن $١٠^{-١٠}$ أكبر من $١٠^{-٣٥}$ بمقدار $١٠^{٢٥}$ مثلًا (أي أنها أكبر بعشرة مليون مليار مليار مثل). وبهذا المعنى فإن عهد التضخم بعيد عن عهد بلازما الكوارك بمثل ما نبعد نحن به الآن عن عهد بلازما الكوارك، ولكن من الجانب الآخر. هذا هو السبب في أننا فحسب «نظن» أننا نعرف ما حدث وقتها. على أننا أخيرًا أصبحنا على استعداد لترتيب قصة طريقة نشأة الكون منذ ذلك الوقت الذي انخفضت فيه كثافته إلى كثافة المادة النووية حاليًّا، فها هنا نحن نعرف بالضبط ماذا كان يجري.

قبل ذلك الوقت، حتى زمن يقرب من جزء من عشرة آلاف من الثانية بعد البداية، لم تكن البروتونات والنيوترونات هي الباريونات الوحيدة في كرة النار الكونية. كان لا يزال ممكنًا إنتاج باريونات أثقل وغير مستقرة (في أزواج من الجسيم-مضاد الجسيم) تنتج خارجة من الطاقة المتاحة قبل أن يبيد أحدها الآخر مرة أخرى. إلا أنه مع انخفاض الحرارة لم يعد ممكنًا بعد إنتاج المزيد من هذه الباريونات الثقيلة، وحتى ما بقي منها فإنه إما يبيد الواحد منها الآخر أو أنها تضمحل لتتحول في النهاية إلى بروتونات ونيوترونات. ومقدار درجة الحرارة لإنتاج أزواج البروتونات والنيوترونات أنفسها يقرب من $١٠^{١٣}$ كلفن، وتكون درجة حرارة الكون قد انخفضت إلى ما يقرب من $١٠^{١٢}$ كلفن وقت التوصل إلى الكثافة النووية عند زمن يقرب من $١٠^{-٤٠}$ ثانية بعد البداية.

على أنه يبقى هناك مقدار وافر من الطاقة المتاحة لصنع الجسيمات الأخف كثيرًا، جسيمات الإلكترونات والبوزيترونات، ومن ثم فإن الصورة التي ينبغي أن تكون لدينا هي صورة كرة نار ذات كثافة نووية. لكنها تتكون أساسًا من الفوتونات وأزواج الإلكترون-البوزيترون، مجدولة في نسيج به ما يقرب من بروتون واحد أو نيوترون واحد لكل مليار فوتون (مع وجود فائض يساوي ذلك من الإلكترونات الزائدة عن البوزيترون). عدد النيوترونات عند هذه المرحلة يساوي تقريبًا عدد البروتونات، والسبب في ذلك هو التفاعلات التي تستخدم فيها جسيمات النيوترينو. يحدث عند الحرارة التي تزيد عن $١٠^{١٠}$ كلفن (عشرة مليارات درجة)، أنه عندما يصطدم نيوترينو بنيوترون فإنه يحوله إلى بروتون مضافًا إليه إلكترون، في حين أنه عندما يصطدم إلكترون ببروتون فإنه يحوله إلى نيوترون ونيوترينو، ويتواصل كلا التفاعلين بدرجة متساوية من السهولة. إلا أن درجة الحرارة تنخفض إلى أقل من عشرة مليارات درجة، ويحدث هذا عندما يكون عمر الكون أكثر بالكاد من ثانية واحدة، ومع هذا الانخفاض في الحرارة تبدأ أهمية حقيقة أن النيوترونات أثقل قليلًا من البروتونات (بنسبة العُشر من الواحد في المائة). تقل ثم تقل الطاقة المتاحة، ويصحب ذلك أن تتزايد صعوبة تعويض فارق الكتلة عندما يصطدم أحد الإلكترونات ببروتون،

ومن ثم فإن التفاعلات التي تصنع النيوترونات من البروتونات تصبح أقل فاعلية من التفاعلات التي تصنع البروتونات من النيوترونات، حيث لا تتطلب هذه الأخيرة مُدخلًا إضافيًّا من الطاقة. عندما يكون الوقت بعد البداية بعُشر واحد من الثانية، تكون نسبة النيوترونات إلى البروتونات قد انخفضت إلى ٣:٢، وعندما يكون الوقت بعد البداية بما يقرب من ثانية واحدة، يكون عدد النيوترونات قد انخفض أكثر، بحيث إن ربعًا واحدًا من كتلة الباريونات يكون في شكل نيوترونات، أو بكلمات أخرى يكون هناك نيوترون واحد لكل ثلاثة بروتونات. ربما كانت النيوترونات ستختفي كليًّا، إلا أنه في حوالي درجة الحرارة نفسها أي عند ١ ميجا إلكترون فولت، يصبح تأثير جسيمات النيوترينو، التي تعمل فقط من خلال التفاعل الضعيف، تأثيرًا أقل فاعلية. مكتبة الرمحي أحمد

دعنا نتذكر أنه بعد البداية بثانية واحدة، عندما تكون درجة الحرارة مليار درجة تقريبًا، تكون الظروف في الكون بأسره مشابهة للظروف في القلب من نجم سوبرنوفا يتفجر حاليًّا. سنرى في هذه الظروف أنه مع وجود درجات قصوى من الضغط، والكثافة، والحرارة في القلب من السوبرنوفا، تظل جسيمات النيوترينو تتفاعل بقوة مع المادة الباريونية. إلا أن جسيمات النيوترينو الناتجة بواسطة تفاعلات الجسيمات في قلب نجم عادي كالشمس تنساب خارجة خلال كل جسم النجم بسهولة أكثر من سهولة مرور الضوء خلال لوح من الزجاج. بدءًا من وصول عمر الكون إلى ما يقرب من الثانية تتوقف جسيمات النيوترينو أساسًا عن التفاعل مع البروتونات والنيوترونات، إلا مع ما يحدث أحيانًا من اصطدامات نادرة. يغدو الكون شفافًا لجسيمات النيوترينو عندما تنخفض كثافته إلى ما يقل تقريبًا عن ٤٠٠٠٠٠ مثل لكثافة الماء ويقال عندها إنها قد «فك اقترانها decoupled» بالمادة العادية اليومية. إلا أن جسيمات النيوترينو لا تزال موجودة هنا — بمعدل يقدر بمليار أو ما يقرب لكل متر مكعب من الفضاء، أو بمعدل من مئات عديدة لكل سنتيمتر مكعب — وربما لا يزال لهذه النيوترينوات أهميتها بطرائق أخرى، كما سوف نرى.

حتى بعد أن يصبح عمر الكون ثانية واحدة، تحدث من آن لآخر تفاعلات تدخل فيها إلكترونات لها طاقة أكثر من المتوسط ولا تزال هذه

التفاعلات قادرة على صنع النيوترونات من البروتونات، وإن كان عدد هذه التفاعلات ينخفض انخفاضًا سريعًا. بحلول زمن من ١٣,٨ ثانية بعد البداية، تنخفض درجة الحرارة إلى ثلاثة مليارات درجة، وعندها يكون ١٧ في المائة من الباريونات لا يزال باقيًا في شكل نيوترونات. هذه لحظة مهمة في قصة تنامي الكون، لأنه عند درجة ثلاثة مليارات كلفن لن تكون هناك طاقة كافية ولا حتى لصنع أزواج من الإلكترون-البوزيترون، والأزواج التي بقيت منها بعد هذا الوقت يحدث تدريجيًا أن يبيد الواحد منها الآخر، لتتخلف بعدها آثار الإلكترونات التي تُستقى في النهاية من كسر سمترية سي بي، والتي توازن بالضبط عدد البروتونات، مع تخلف إلكترون واحد لكل بروتون في الكون (وبهذا المعنى، فإن النيوترون يعد وكأنه اتحاد لبروتون وإلكترون، نتج عن تلك التفاعلات التي تدخل فيها جسيمات النيوترينو). البروتونات والنيوترونات الباقية لم تعد مغمورة في بحر من إلكترونات وبوزيترونات مفعمة بالطاقة النشطة، وإنما هي أساسًا قد خُلفت متروكة لأساليبها الخاصة بها.

البروتونات عندما تترك لأساليبها الخاصة، فإنها كما سبق أن رأينا تكون مستقرة جدًّا وطويلة العمر، إلا أن النيوترون الوحيد يكون غير مستقر ويضمحل إلى بروتون، وإلكترون، ومضاد نيوترينو، بعمر نصف يساوي ١٠,٣ دقيقة يعني هذا أنه أيًا ما تكونه كثرة عدد النيوترونات التي بدأنا بها، فإنه بعد ١٠,٣ دقيقة يكون نصفها قد اضمحل، في كل مائة ثانية سيضمحل ما يقرب من ١٠ في المائة من النيوترونات الحرة. إلا أننا نجد أنه عند وقت يسبق كثيرًا وصول عمر الكون إلى ١٠,٣ دقيقة، تكون النيوترونات التي بقيت في الوجود قد احتُبست في أمان داخل نوى الذرات، حيث تكون مستقرة ولا تضمحل.

بخلاف البروتون نفسه، الذي يمكن أن يعتبر كنواة لذرة الهيدروجين، نجد أن أبسط نواة لذرة هي نواة الديوتريوم، وتتكون من بروتون واحد ونيوترون واحد مربوطان معًا بالقوة القوية. بدأت هذه النوى تتكون لوقت وجيز حينها، عندما كان عمر الكون أقل من نصف الدقيقة، ولكنها سرعان ما كانت تتحطم بدءًا في اصطدامات. طاقة الربط في الديوترون (كما تسمى

نواة الديوتريوم) هي فقط ٢٫٢ ميجا إلكترون فولت، وهذا يعني أن أي اصطدام له مع جسيم آخر يحمل هذا القدر من الطاقة (كبروتون، أو نيوترون، أو حتى فوتون فيه طاقة ملائمة) سيؤدي إلى تحطمه بددًا. عندما يصبح عمر الكون مائة ثانية، تكون نسبة النيوترونات قد انخفضت لما يقرب من ١٤ في المائة؛ يبقى نيوترون واحد لا غير لكل سبعة بروتونات. إلا أن حرارة الكون عند هذا الوقت تكون قد انخفضت إلى أقل من مليار درجة (أقل قليلًا من مائة مثل درجة الحرارة في قلب الشمس حاليًّا)، وهذا يناظر طاقات للجسيمات قدرها فحسب ٠٫١ ميجا إلكترون فولت. لا يعود هناك طاقة كافية في اصطدامات الجسيمات لتحطم الديوترونات بددًا، وأي نيوترونات تصبح مربوطة بالبروتونات بهذه الطريقة تكون الآن آمنة من الاضمحلال.

تسمى هذه العملية التركيب النووي nucleosynthesis، وهي لا تتوقف هنا. مع انخفاض طاقة الاصطدامات، نجد أن الديوترونات نفسها تشارك في تفاعلات أخرى مع النيوترونات، والبروتونات، والديوترونات الأخرى، لتصنع نوى أثقل قليلًا. تؤدي زيادة نيوترون إضافي إلى صنع نواة تريتيوم (نيوترونان اثنين وبروتون واحد)، بينما هناك حتى نوى أكثر استقرارًا تتألف من بروتونين زائد نيوترون واحد (هيليوم-٣) أو بروتونين زائد نيوترونين (هيليوم-٤). أكثر هذه النوى استقرارًا هي هيليوم-٤، ولديها طاقة ربط من ٢٨ ميجا إلكترون فولت، تناظر ٧ ميجا إلكترون فولت لكل باريون في النواة، كنتيجة لاستقرار هذه النواة، فإن النيوترونات المتاحة كلها تقريبًا تُحتبس سريعًا داخل نوى هيليوم-٤، وإن كان يوجد أيضًا آثار ضئيلة متخلفة من الديوتريوم، والترتيوم، وهيليوم-٣، ونواة واحدة أثقل قليلًا هي ليثيوم-٧، التي تحوي ثلاثة بروتونات زائد أربعة نيوترونات وهي مصنوعة أساسًا بأن تلتصق معًا نواة من هيليوم-٤ ونواة من التريتيوم. على أنه لم تتكون عناصر أثقل في الانفجار الكبير، لأن حرارة الكون سرعان ما انخفضت إلى أقل من الدرجة التي يمكن بها للنوى أن تلتصق معًا بطرائق أكثر تعقدًا. النوى والبروتونات كلها لها شحنة كهربائية موجبة، والشحنات المتشابهة تتنافر، ولهذا السبب فإن الأمر يتطلب قدرًا معينًا من الطاقة

لضغطها معًا إلى مسافة قريبة بما يكفي لأن تسود القوة القوية بالمدى القصير لفعلها، فتشدها معًا، وعندما وصل عمر الكون إلى مائتي ثانية أصبح لا يوجد بعد طاقة متخلفة بالقدر الكافي للتغلب على هذا الحاجز الكهربائي.

أثناء حدوث هذا كله كان هناك في الكون نيوترون واحد لكل سبعة بروتونات، أي أن النيوترونات كانت موجودة بمعدل واحد لكل ثمانية باريونات. تحوي كل نواة من هيليوم-٤ العدد نفسه من البروتونات والنيوترونات، وهذا يعني أن بروتونًا واحدًا يُحتبس لكل نيوترون، وعمومًا فإن باريونين اثنين من ثمانية، أو ربع واحد من العدد الكلي يحتبس في هيليوم-٤، وتترك ثلاثة أرباع الباريونات كبروتونات حرة لتشكل نوى الهيدروجين، وذلك فيما عدا الآثار الضئيلة من العناصر التي ذكرناها فيما سبق، والتي يبلغ مجموعها كلها كسرًا من الواحد في المائة لا غير. تتساوى تقريبًا كتل البروتونات والنيوترونات، ويعني هذا أن ربعًا واحدًا من كتلة الباريونات التي انبثقت من الانفجار الكبير يكون في شكل هيليوم، بينما تكون ثلاثة أرباع الكتلة في شكل هيدروجين، يكتمل معظم هذا النشاط بوصول عمر الكون إلى أربع دقائق، يتوقف التركيب النووي بالكامل عندما يصل الكون إلى سن النضوج في عمر من ثلاث عشرة دقيقة. على أنه في ذلك الوقت لم يكن هناك بعد أي ذرّات، مجرد نوى حرة وإلكترونات حرة تتحرك في بحر من الإشعاع ما زال بعد مفعمًا بطاقة شديدة النشاط بالمقاييس الأرضية. لم يحدث الشيء الكثير طيلة القليل من مئات الألوف من السنين التالية، فيما عدا أن الكون الذي ما زال يسوده الإشعاع، قد استمر في التمدد والابتراد.

في ذلك الوقت كان الكون ما زال «يسوده» الإشعاع حقًا. في حوالي الوقت الذي بدأ فيه التركيب النووي، بعد البداية بزمن ٠,١ من الثانية، كانت كثافة الكون بين خمسة ملايين وعشرة ملايين مثل كثافة الماء. إلا أن الباريونات كانت تساهم بنفسها في جزء من هذه الكثافة يساوي فحسب ما يقرب من المثل ونصف المثل لكثافة الماء. كل باقي الكثافة تقريبًا هو كثافة تسهم بها طاقة الإشعاع — أو إن شئت فهي كثافة الفوتونات — وفقًا

لمعادلة الكتلة = الطاقة/مربع السرعة. أما حاليًّا، فعلى الرغم من أن المادة تنبسط بسمك رفيع إلى حد بعيد، إلا أن ديناميات الكون يسودها تأثير المادة — وذلك بشرط واحد سنناقشه في فصول لاحقة وإن كان لا يؤثر فيما نناقشه هنا — بينما انخفض دور الإشعاع إلى الهسيس الضعيف لخلفية الميكروويف، ومع درجة حرارة هي فحسب ٢,٧٣ كلفن. بعد التركيب النووي نجد أن علامة الطريق التالية المهمة في تنامي الكون تقع عندما يصبح الإشعاع أقل أهمية من المادة فيما يتعلق بالكثافة. حدث هذا بعد البداية بالقليل من مئات الآلاف من السنين، وذلك بفضل اختلاف أساسي في طريقة سلوك المادة والإشعاع عندما ينضغطا أو عندما يتمددا.

الكثافة هي مقياس لمقدار الأشياء في حجم معين. في الكون (المسطح) الثلاثي الأبعاد، يكون حجم المنطقة من الفضاء في تناسب مع مكعب مقياسها الخطي، عندما يكون لكرة نصف قطر مقداره ضعف نصف قطر كرة أخرى يكون للكرة الأكبر حجم مقداره ثمانية أمثال (٢^٣) حجم الكرة الأصغر. ومن ثم فإنه عندما كان للكون الذي يرصد حاليًّا نصف مقياسه الخطي الحالي، والمجرات مفصولة إحداها عن الأخرى بالنصف فقط من مسافات تباعدها الحالية. فإن الكون عندها يكون حجمه ثُمنًا واحدًا من حجمه الحالي وتكون كثافة المادة فيه ثمانية أمثال الكثافة الحالية. إلا أن كثافة الإشعاع تخضع لقاعدة تختلف قليلًا عن ذلك. إذا تخيلنا صندوقًا من الإشعاع وضاعفنا طول كل جانب من الصندوق، يتزايد الحجم بعامل من ثمانية، وتنخفض كثافة الإشعاع بعامل من ثمانية بالطريقة نفسها كما هي للمادة. إلا أننا نجد في الوقت نفسه أن طول موجة الإشعاع يزيد إلى الضعف، وهذه هي الإزاحة الحمراء المشهورة، التي تسمى هكذا لأننا نجد في طيف ضوء قوس قزح أن اللون الأحمر طول موجته أطول من الألوان الأخرى. يناظر ذلك إضعاف لطاقة الإشعاع، يعني انخفاضًا فيما يساويها من كتلة. ومن ثم فإنه بوجه عام، لا يكون تغير كثافة الطاقة بمقدار مكعب التغيير في المقاييس الخطية وإنما هو بالأس الرابع. عندما كان الكون الحالي عند نصف مقياسه الخطي الحالي، كانت كثافة الإشعاع فيه أكبر مما هي عليه حاليًّا بست عشرة مرة (٢^٤) وليس بثماني مرات.

عندما كان الكون، بالمعنى الخطي، في عُشر مقياسه الحالي، كانت الكثافة الباريونية أكبر مما هي عليه الآن بألف مرة، ولكن كثافة الإشعاع كانت أكبر مما هي عليه الآن بعشرة آلاف مرة، وهكذا دواليك. من السهل أن نرى كيف تؤدي هذه العملية إلى تعزيز أهمية الإشعاع كلما نظرنا إلى الوراء في الزمان، حتى نجد أنه بعد القليل من مئات الآلاف من السنين عقب البداية، كانت المادة والإشعاع يسهمان إسهامًا متساويًا في كثافة الكون، في حين أنه في الأزمنة الأسبق كان الإشعاع صاحب الإسهام الأكثر أهمية إلى حد بعيد.

في نفس الوقت الذي انخفضت فيه كثافة الإشعاع إلى أقل من كثافة الباريونات، عندما كان عمر الكون هو القليل من مئات الآلاف من السنين، «فُك اقتران» المادة والإشعاع أحدهما بالآخر وانطلق كل منهما في طريقه المنفصل. كانت الحرارة قبل ذلك الوقت أعلى كثيرًا من أن تسمح بتكوين ذرات متعادلة كهربائيًّا. إلا أن الفوتونات — وهي على كل حال الجسيمات التي تحمل التفاعل الكهرومغناطيسي — تتفاعل بقوة مع الجسيمات المشحونة. تتحرك النوى الموجبة الشحنة والإلكترونات السالبة الشحنة في بحر ساخن من الفوتونات، وتكوّن بلازما، تتفاعل فيها الفوتونات مع الجسيمات المشحونة عند كل منعطف (وهي في الواقع تتواثب مرتدة منها)، متبعة مسارًا متعرجًا خلال الفضاء مثل كرة ذات سرعة كبيرة في ماكينة مجنونة للعبة كونية للكرة والدبابيس.[5] طالما أن حرارة الكون تزيد عن آلاف قليلة من الدرجات، فإن أي إلكترون تمسك به نواة، سيحدث في التو تقريبًا أن يرتطم متحررًا بتأثير الاصطدام بفوتون مفعم بالطاقة النشطة. إلا أنه مع انخفاض الحرارة إلى أقل من هذا المقدار، تصبح قوة الاصطدام بالفوتونات أضعف كثيرًا من أن تكسر راوبط القوى الكهرومغناطيسية التي تُبقي الذرات متماسكة معًا، وتصبح كل الإلكترونات والنوى محتبسة تدريجيًا في ذرات متعادلة. لا يعود هناك جسيمات حرة مشحونة كهربائيًّا تعوق طريق الفوتونات، وهكذا فإن الفوتونات تتمكن من أن تنساب خلال الفضاء ولا شيء يعترضها إلى حد بعيد.

---

[5] لعبة تدفع فيها كرات صغيرة فوق سطح منحدر وسط دبابيس وعوائق في صندوق قبل أن تصل إلى الهدف. (المترجم)

ليس من باب الصدفة أن يحدث هذا كله عند درجة حرارة تقرب من حرارة سطح الشمس حاليًا، ذلك أن العملية نفسها بالضبط تجرى الآن هناك. حرارة الشمس تحت سطحها تزيد عن ٦٠٠٠ كلفن، وعندها تُنزع الإلكترونات من الذرات المتعادلة بواسطة الاصطدام بطاقات نشطة، وتكون المادة في شكل بلازما تماثل آخر مراحل كرة النار التي ولد فيها الكون. حتى يكون لدينا بعض فكرة عن مدى صعوبة حياة أحد الفوتونات التي تقع في الشرك داخل هذه البلازما، فإن الفوتون الذي يبدأ رحلته من قلب الشمس، ما إن ينتقل في المتوسط سنتيمترًا واحدًا حتى يصطدم بجسيم مشحون ليرتد مبتعدًا في اتجاه عشوائي. ومن ثم فإنه يتحرك في خطوات متعرجة يقرب طول كل واحدة منها من سنتيمتر واحد، ويستغرق عادة عشرة ملايين سنة للوصول إلى سطح الشمس، مع أنه ينتقل بسرعة الضوء. لو كان يمكن للفوتون أن يتحرك في خط مستقيم من مركز الشمس إلى سطحها، لاستغرقت رحلته ٢,٥ ثانية لا غير. ولكنه يتحرك بالمعنى الحرفي مسافة إجماليها عشر سنوات ضوئية، فيتحرك وهو في طريقه إلى الخارج إلى الوراء وإلى الأمام وجانبًا في خطوات من السنتيمتر. لو سوينا مساره المتعرج في خط مستقيم فسيكون امتداده مسافة أطول بخمس مرات من المسافة من هنا إلى مجرة أندروميدا (المرأة المسلسلة) أقرب جارة كبيرة لمجرتنا درب التبانة. لا يحدث إلا عند سطح الشمس أن تتحد الإلكترونات مع النوى لتصنع ذرات متعادلة، وأن تستطيع الفوتونات أن تنساب حرة خارجة إلى الفضاء.

نحن نعيش على كوكب حيث الذرات المتعادلة كهربائيًا هي الذرات الطبيعية، ولا بد لها من أن تتفكك أجزاؤها منفصلة لتصنع بلازما لتستطيع بعدها أن تعاود الاتحاد لصنع الذرات، ولهذا السبب فإن الفيزيائيين يسمون العملية التي تتحد فيها معًا النوى والإلكترونات في البلازما لتصنع ذرات متعادلة بأنها عملية إعادة الاتحاد. بل إنهم يستخدمون هذا المصطلح فيما يتعلق بالأحداث التي وقعت عندما كان عمر الكون القليل من مئات الآلاف من السنين، ولو أننا تحرينا الدقة في كلامنا لوجدنا أن هذا لم يكن «إعادة اتحاد وإنما هو لا غير «اتحاد»، فهذه أول مرة في تاريخ الكون تتحد فيها

الإلكترونات والنوى بهذه الطريقة. أيًا كان ما تسمى به هذه العملية، فإن الكون بأسره عند إعادة الاتحاد كان يشبه سطح الشمس الآن، والفوتونات التي يتم الآن الكشف عنها كإشعاع خلفية الكون الميكروويفية أخذت تنساب دائمًا منذ ذلك الوقت خلال الفضاء دون أن تتفاعل مع أي مادة حتى تصل إلى الوقوع في أطباق ما لدينا من تلسكوبات الراديو.

هناك تشبيه بارع يعطينا بعض إحساس بمدى بعد المسافة التي تنظر بها تلسكوبات الراديو هذه إلى الوراء تجاه الانفجار الكبير. أتى هذا التشبيه أصلًا بواسطة الفيزيائي الأمريكي جون هويلر إلا أنه تم تجديده مؤخرًا بواسطة آلان جوث في كتابه «الكون المتضخم». إذا شبهنا نظرتنا إلى الوراء عبر الكون بأننا ننظر إلى أسفل إلى الشارع من قمة ناطحة السحاب «إمبير ستيت»[٦] في نيويورك، واعتبرنا أن مستوى الشارع يمثل البداية منذ ١٤ مليار سنة، فإن أبعد المجرات التي نراها الآن ستكون مناظرة للطابق العاشر فوق مستوى الشارع، وتكون أقصى الكوازارات[٧] التي رصدت حتى الآن عند ما يرادف الطابق السابع. أما عهد إعادة الاتحاد الذي نلمحه في شكل إشعاع الخلفية فهو يقابل شيئًا نراه على مسافة سنتيمتر واحد فوق مستوى الشارع. هذا هو السبب في أن أرصاد إشعاع الخلفية بالغة الأهمية من أجل فهمنا للفترة المبكرة من تنامي الكون.

حتى بدون أن ندخل في أهمية التراوحات بالغة الصغر في حرارة كرة النار ما بين مكان وآخر، سنجد أن مجرد قياسنا عمومًا لحرارة إشعاع الخلفية حاليًا ومعرفة «كثافة» الفوتونات في الكون، مجرد فعل ذلك سيوفر لنا تبصرات مهمة تتعلق بطبيعة الكون. في القصة التي رسمنا خطوطها الخارجية في هذا الفصل، حددنا درجات الحرارة (الطاقات) في الأوقات المختلفة أثناء تنامي الانفجار الكبير. ولكن كيف عرفنا هذه الدرجات من الحرارة بهذه الدقة؟ السبب ببساطة هو أننا نستطيع قياس درجة حرارة

---

[٦] إمباير ستيت أعلى ناطحة سحاب في نيويورك (بعد تدمير برجي التجارة العالمية) وتتكون من ١٠٢ طابق وترتفع إلى ما يقرب من ٤٥٠ مترًا. (المترجم)

[٧] الكوازارات: أقصى الأجرام بعدًا مما اكتشف حتى الآن من أجرام الكون المضيئة. وتعد الكوازارات القلوب المضيئة لمجرات صغيرة السن توجد على أبعاد كونية سحيقة، ويعتقد أن لها في مركزها ثقوبًا سوداء ذات كتلة فائقة. (المترجم)

إشعاع الخلفية حاليًّا، ثم نستخدم المعادلات التي تصف ما يحدث للإشعاع عندما ينضغط ونستخدم إضافة لذلك معادلات النظرية العامة للنسبية التي تصف كيف يتمدد الكون، وبهذا نستطيع أن نبحث ونحسب وراء في الزمان لأي عهد يهمنا. سينبئنا هذا مثلًا بدرجة الحرارة في وقت التركيب النووي الأوّلي (أو إذا شئت، سينبئنا عن أي الأوقات في تنامي الكون المبكر كانت درجة الحرارة ملائمة لأن يحدث التركيب النووي).

على أن المعدل الذي يحدث به هذا التركيب النووي الأوّلي، لا يعتمد فقط على درجة الحرارة. فهو يعتمد أيضًا على ما يوجد وقتها من كثافة للباريونات (وبالأخص الجسيمات النووية، أي البروتونات والنيوترونات التي تُعرف إجمالًا بالنيوكليونات). كلما زاد ما يوجد من نيوكليونات، زاد ما يمكن أن يحدث من تفاعلات نووية، وكلما قل عدد النيوكليونات، قل ما يحتمل أن تحدث من تفاعلات لبناء الديوتريوم، والهيليوم والليثيوم. نحن على معرفة جيدة نوعًا بكثافة الفوتونات في الكون، ولهذا السبب فإن من الملائم قياس كثافة النيوكليونات بحسابها نسبيًّا، بالمقارنة بكثافة الفوتونات. تعتمد التفاعلات النووية المختلفة على هذه النسبة وبدرجات مختلفة من الحساسية. أشد التفاعلات حساسية هي تلك التي تنتج الديوتريوم. تظهر الحسابات أنه إذا كان هناك نيوكليون واحد لكل ١٠٠ مليون فوتون في وقت التركيب النووي الأولي، فسيكون هناك إذن في المادة الباريونية حاليًّا مقدار من الديوتريوم هو فقط ٠,٠٠٠٠٨ من جزء لكل مليون؛ فقط ثماني نوى ديوتريوم من بين كل ١٠٠ مليار. إذا كانت نسبة الفوتون للنيوكليون هي المليار إلى الواحد، فسيكون هناك ست عشرة نواة ديوتريوم لكل مليون. وإذا كانت النسبة ١٠٠٠٠ مليون إلى الواحد، فسيكون هناك ستمائة نواة ديوتريوم لكل مليون. الحقيقة أن الأرصاد الطيفية لأقدم النجوم تبين نسبة وفرة للديوتريوم هي ما بين ستة عشر إلى عشرين لكل مليون نواة، بما يناظر نسبة من الفوتون إلى الباريون تزيد بالكاد عن المليار إلى الواحد.

التحليل الطيفي أداة لها أهمية أساسية في علم الفلك بحيث إنها تستحق هنا استطرادًا موجزًا. كل نوع من الذرات (كل عنصر) ينتج عنه طبعة مميزة من الخطوط عند أطوال موجات معينة في طيف الضوء، وهي طبعة

فريدة مثل بصمة الإصبع أو مثل شفرة الخطوط العمودية لأسعار سلع السوبر ماركت، ولهذا السبب فإن علماء الفلك يستطيعون معرفة ما يصنع أحد الأشياء طالما يستطيعون رؤية الضوء الآتي منه، حتى إذا كان هذا الشيء بعيدًا عنا بعدًا كبيرًا عبر الكون. الذرات الباردة تستطيع أن تمتص أطوال موجات معينة من الضوء بالنمط نفسه بالضبط الذي ستشع به لو كانت ساخنة، ولهذا فإننا نستطيع أيضًا أن نكتشف ما صنعت منه سحب الغاز والغبار في الفضاء بأن نحلل الضوء الذي يمر من خلالها آتيًا من النجوم البعيدة. عندما تتحرك الأجرام خلال الفضاء متجهة نحونا، نجد أن نمط الخطوط الطيفية كله ينضغط تجاه الطرف الأزرق للطيف، وعندما تتحرك الأجرام بعيدًا عنا يمتط النمط تجاه الطرف الأحمر من الطيف (إزاحة حمراء). يسمى هذا بأنه إزاحة دوبلر[٨] وهي تنبئنا بمدى سرعة تحرك النجوم والمجرات خلال الفضاء. أما الإزاحة الحمراء الكونية المشهورة فتنتج عن عملية مختلفة، عملية مط الفضاء نفسه بين المجرات، وهذه عملية تنبئنا عن مدى سرعة تمدد الكون، وتنبئنا ضمنا بزمن ميلاده. لولا التحليل الطيفي لما عرفنا إلا أقل القليل عن الكون الذي نقطن فيه، ولما كان لهذا الكتاب أن يكتب قط (هو وكتب كثيرة أخرى).

على أننا نستطيع بالاستعانة بالتحلل الطيفي أن نقيس ما في النجوم القديمة من نسبة الهيليوم والليثيوم وكذلك الديوتريوم، وأن نستخدم هذه القياسات في صقل حساباتنا لكثافة النيوكليونات عند وقت التركيب النووي الأوّلي. ينتج عن معرفتنا لهذه النسب — كأن نعرف مثلًا حقيقة أن ما يقرب من ٢٥ في المائة من كتلة الباريونات هي في شكل هيليوم — أننا نعرف ما كانت عليه الأحوال خلال عهد التركيب النووي الأولي. تتفق كل الأرقام معًا، بشرط أن تكون كثافة النيوكليونات في الكون المبكر في نطاق مدى صغير نوعًا من القيم. باستخدام لغة من وحدات من الجرامات لكل سنتيمتر مكعب، تكون الأرقام أصغر من أن تُفهم بسهولة، فهي تناظر كثافة للمادة الباريونية في الكون حاليًّا قدرها عدة أمثال قليلة لمقدار ١٠^{-٣١}

---

[٨] دوبلر اسم العالِم الذي وصف هذه الظاهرة علميًّا بالنسبة لموجات الصوت والضوء عندما تقترب أو تبتعد عنا. (المترجم)

جرام لكل سنتيمتر مكعب. سيكون من المعقول كثيرًا التفكير بلغة من الكثافة الحرجة التي يكون الكون عندها مسطحًا بالضبط.

كما سبق أن رأينا، لدينا كل سبب قوى للاعتقاد بأن الكون مسطح بهذا المعنى، وتتنبأ نظرية التضخم بأنه لا بد أن يكون الكون قريبًا من التسطح قربًا وثيقًا لا يمكن تمييز مداه. يعيّن علماء الفلك هذه الكثافة الحرجة للتسطح بأن قيمتها هي الواحد. عندما كنت في أول عملي بالفلك في أواخر الستينيات وفي السبعينيات من القرن العشرين كانت الأدلة من إشعاع الخلفية، ونسب الوفرة المرصودة لأخف العناصر في أقدم النجوم، كلها تنبئنا بأن كثافة الباريونات في الكون حاليًا تقع بين ٠,٠١ و٠,١. يعني هذا أن الباريونات — الخامة التي صُنعنا منها. والخامة التي صنعت منها كل النجوم والمجرات الساطعة في الكون — تسهم بما بين ١ في المائة إلى عشرة في المائة من الكتلة اللازمة لجعل الكون مسطحًا. في ذلك الوقت كان هذا الاكتشاف فيما يبدو (بل إنه كان بالفعل) إنجازًا مذهلًا للعلم وللعقل البشري. إلا أنه بحلول ٢٠٠٥ تبين مع تحسن الأرصاد أن هناك ما بين ٤ في المائة إلى خمسة في المائة من الكثافة الحرجة في شكل باريونات، وربما تكون النسبة أقرب إلى ٤ في المائة — وهذه القياسات هي أفضل على الأقل بعشر مرات مما كانت عليه من ثلاثين سنة. (هناك فقط نسبة لا تزيد عن خُمس هذه المادة الباريونية، أي ما يُعد أقل من ١ في المائة من الكتلة اللازمة لجعل الكون مسطحًا، تكون في شكل نجوم ومجرات لامعة). لا يوجد مفر من هذا الاستنتاج، ومن ثم إذا كان الكون حقًّا مسطحًا فلا بد أنه يحوي شكلًا من أشكال المادة ليست مصنوعة من الباريونات (أي أنها مادة لا باريونية) ولا يمكن رؤيتها، لأنها لا تضيء (أو بكلمات أخرى فهي مادة مظلمة، أو ربما طاقة مظلمة)، لا بد أن ٩٥ في المائة على الأقل من كتلة الكون هي مادة لا باريونية.

ثبت في النهاية أن هذا أمر طيب. على الرغم من أن طبيعة هذه المادة المظلمة بقيت لغزًا (كما سنرى في الفصل السادس)، إلا أنه لولاها لما كان هناك مجرات وربما لما كان هناك نجوم. التأثير الجذبوي للمادة المظلمة له أهمية حاسمة في تنامي نوع البنية التي نراها في الكون حاليًا (بما في

ذلك نحن أنفسنا)، وقد بدأت من التقلبات الصغيرة في كرة النار الكونية التي تتكشف عن طريق التموجات في إشعاع الخلفية، والتي بدأت أصلًا هي نفسها من التقلبات الكمومية التي حدثت أثناء فترة التضخم.

الفصل الخامس

كيف نشأت بنية الكون الحالية؟

في زمن إعادة الاتحاد، عندما كان عمر الكون بضع مئات آلاف من السنين، نجد أن مناطق اللاتناسقات في توزيع المادة الباريونية، كما يتكشف في تموجات أشعة خلفية الكون الميكروويفية، يصل مقدارها فقط إلى جزء واحد من المائة ألف. يكافئ هذا تموجات ارتفاعها سنتيمتر واحد فحسب على سطح بحيرة عمقها كيلومتر. لو كان الكون لا يحوي إلا باريونات توفر فقط ٥ في المائة أو أقل من الكثافة اللازمة للتسطح، لنتج عن تمدد الكون مطٌّ هذه التموجات وشدها منفصلة قبل أن تستطيع الجاذبية شد الباريونات معًا بقوة لتصنع أشياء مثيرة للاهتمام مثل النجوم والمجرات. الشد الجذبوي لمويجة بهذا الصغر سيكون أضعف إلى حد بعيد من أن يقاوم تمدد الكون. على أن هناك أدلة أخرى تتأتى أيضًا من تحليل إشعاع الخلفية، وتدل على أنه في خلال مليار سنة — وربما حتى بمجرد مرور نصف مليار سنة — منذ بدء انطلاق إشعاع الخلفية، تتكون أجرام ساخنة، أو أشياء مماثلة للنجوم أو النجوم الفائقة، وتمارس تأثيرًا على ما حولها.

التأثير الوثيق الصلة بالموضوع هو أن هذه النجوم الفائقة الأولى جعلت الغاز القريب منها ساخنًا. أدت هذه السخونة إلى انتزاع الإلكترونات من ذرات الهيدروجين والهيليوم، وأعادت تأيين المادة التي كانت قد اتحدت في شكل ذرات متعادلة عند وقت إعادة الاتحاد، عندما كان عمر الكون تقريبًا جزءًا من الألف من عمره عند زمن إعادة التأين. يعني هذا أنه وجدت مرة أخرى إلكترونات حرة في الكون تستطيع أن تتفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي تخلف عن كرة نيران الانفجار الكبير. ولكن كثافة

الكون تكون قد انخفضت كثيرًا بحلول هذا الوقت، وبسبب ذلك فإن إشعاع الخلفية لا يكون معتمًا إعتامًا كاملًا. بدلًا من ذلك نجد أن المادة المتأينة تخلق بصمة مميزة على هذا الإشعاع أثناء مرورها من خلاله. الحقيقة أن هذه البصمة التي نراها (والتي تؤثر في استقطاب الإشعاع بالطريقة نفسها التي تؤثر بها نظارات الشمس المستقطبة[1] في الضوء الذي يمر من خلالها) هي نتيجة تفاعلات بين الإشعاع والإلكترونات الحرة على طول خط الرؤية منذ زمن إعادة التأين حتى وقتنا الحالي، وهو ما يعد «عمودًا» من المادة القليلة الكثافة يقدر ارتفاعه بنحو ١٣ مليار سنة ضوئية. تخبرنا الأرصاد على نحو تقريبي بعدد الإلكترونات التي توجد في عمود كهذا في أي اتجاه في السماء. بالجمع بين ذلك وبين فهمنا للطريقة التي تغيرت بها كثافة الباريونات في الكون مع تمدده، نستدل على ما يجب أن يكون عليه طول هذا العمود، ومن ثم يدلنا على أين يكون مكان (أو متى يكون زمن) نهايته عند وقت إعادة التأين. هناك بعض من عدم اليقين في هذه التقديرات، وجزء من السبب في ذلك أن إعادة التأين ربما تكون قد حدثت عبر فترة من مئات الآلاف من السنين، بدلًا من أن يبدأ انطلاقها في الوقت نفسه في كل مكان من الكون، والجزء الآخر من السبب هو أن الملاحظات المبنية على دراسات خلفية الكون الميكروويفية تعطينا تقديرات تختلف قليلًا عن التقديرات المبنية على دراسة أبعد الأجسام الساطعة المعروفة التي تسمى بالكوازارات. على أن هذه تفاصيل سيتم حلها بواسطة الجيل التالي من الكاشفات. الأمر الواضح بلا لبس هو أن إعادة التأين قد حدثت عند مليار سنة بعد الانفجار الكبير، على مسافات تبعد عنا بما يكافئ إزاحات حمراء مقدارها أكبر من ٧.[2]

يعطينا تلسكوب هابل الفضائي البرهان الذي يثبت أن المادة قد تكتلت معًا بالفعل في ذلك الوقت لصنع نجوم ومجرات صغيرة (تسمى المجرات

---

[1] نظارات الشمس المستقطبة: نظارات صنعت من مادة مستقطبة للضوء لمنع السطوع المؤذي للعين. (المترجم)

[2] (بما أن الضوء يستغرق وقتًا محددًا لاجتياز الفضاء، وبما أن الإزاحة الحمراء لجرم كوني تخبرنا بمسافة بعده في الكون المتمدد، فإنه نتيجة لذلك يمكن ترجمة الإزاحات الحمراء إلى «نظرة للوراء في الزمان». النظرة للوراء في الزمان لإزاحة حمراء مقدارها مثلًا ٦، تناظر النظرة للوراء في زمان على بعد ١٢٫٥ مليار سنة. حدثت إعادة الاتحاد عند إزاحة حمراء قدرها ١٠٠٠).

القزمة)، فقد التقط التلسكوب صورًا فوتوغرافية لرقعة بالغة الصغر في السماء بزمن تعرض طويل للأشعة ليسجل صورًا لأخفت الأجرام في مجال الرؤية وأقصاها بعدًا. يسمى هذا مجال هابل الأقصى عمقًا. وقد أظهر تحليل هذا المجال في ٢٠٠٤ نحو مائة بقعة حمراء باهتة، تناظر كل واحدة منها مجرة قزمة، نراها بضوء قد غادرها عندما كان عمر الكون أكثر بقليل من مليار سنة. على أنه حتى هذه المجرات لا يمكن أن تكون أول الأجرام الساخنة، التي لا بد أنها تكونت عند إزاحات حمراء قياسها بين ١٥ و٢٠، بما يقابل نظرة إلى الوراء في الزمان عند ١٣ مليار إلى ١٣,٥ مليار سنة، أي بعد الانفجار الكبير بمائتي مليون سنة فقط. لو أمكننا تصوير هذه الأجرام فسيكون ذلك مكافئًا لأن ينظر رجل يبلغ عمره سبعين سنة «نظرة إلى الوراء» لصور فوتوغرافية له وهو طفل رضيع عمره أحد عشر شهرًا.[٣]

لا يزال هناك عنصر من التخمين بمساعدة من المحاكاة بالكمبيوترات، بشأن معرفة طريقة تكوين أول الأجرام الساخنة، ولكننا «نعتقد» أننا نعرف ما حدث. السيناريو التالي هو فيما يحتمل صحيح، على الأقل في مجمل خطوطه الخارجية، وسوف يتم اختباره وتحسينه بواسطة الجيل التالي من تلسكوبات الفضاء.

أول مطلب هو أن نثبت ما يكونه نوع المادة المظلمة التي تتيح تشكيل المجرات. على الرغم من أننا سنذكر في الفصل التالي أشياء أكثر كثيرًا عن المادة المظلمة التي تُبقي الكون متماسكًا معًا، إلا أنه يلزم هنا أن نذكر تمييزًا أساسيًّا واحدًا. عندما أدرك الفلكيون لأول مرة أنه يلزم وجود مادة مظلمة لتفسير ديناميات الكون، كان هناك نوعان اثنان مرشحين للقيام بهذا الدور ومنافس واحد معروف. المنافس هو النيوترينو. كان من المفترض

[٣] شعر كثير من الفلكيين بالدهشة والسعادة، عندما حدث في أواخر ٢٠٠٥ أن كان أفراد فريق من الراصدين يدرسون الأشعة تحت الحمراء التي كشف عنها تلسكوب سبيتزر الفضائي وسجلوا أنهم قد رأوا وهجًا باهتًا لإشعاع الخلفية عند أطوال موجات تحت الحمراء (وهذا إشعاع يتميز تمامًا عن الإشعاع الميكروويفي لخلفية الكون)، وهذا الإشعاع يمكن أن يكون ضوءًا قد انتشر خارجًا من تلك النجوم الأولية من «المجموعة III» وأزيح إزاحة حمراء عالية لتتم رؤيته عبر مسافة ١٣ مليار سنة في الفضاء. يعد هذا دليلًا مستقلًا يدعم التحديد الحسابي لزمن إعادة التأين، ولكنه مع ذلك لا يماثل أن نتمكن من أن نصور مباشرة نجومًا فردية من ذلك الزمن البعيد.

دائمًا أن النيوترينوات كتلتها صفر، ومن ثم فإنها (مثل الفوتونات) تنتقل بسرعة الضوء. على أن الفيزيائيين يعرفون على الأقل أن النيوترينوات لها وجود، وأن الكون فيه كمية بالغة الكثرة من هذه الجسيمات (انبثقت عن الانفجار الكبير نيوترينوات يصل عددها تقريبًا إلى ما يماثل عدد الفوتونات في إشعاع الخلفية) ويبلغ من كثرة النيوترينوات أنه حتى لو كان لكل واحد منها كتلة صغيرة جدًّا، فإن هذه الكتل بإضافتها معًا تصل إلى أن تكون جزءًا مهمًّا من الكثافة اللازمة للتسطح. حتى زمن متأخر يصل إلى بداية تسعينيات القرن العشرين، لم تكن هناك أي تجربة واحدة فوق الأرض تستطيع أن تثبت أن النيوترينوات لها بالفعل كتلة، إلا أنه أتت إلينا كمية مدهشة من المعلومات حول النيوترينوات عن طريق الدراسات الفلكية والكونية.

إذا تركنا جانبًا مسألة الكتلة لحظة، فسنجد أن علم الفلك هو أول ما أثبت بالفعل أن هناك على وجه الدقة ثلاثة أنواع (أو ثلاثة «نكهات») من جسيمات النيوترينو، تناظر بالترتيب الإلكترون، وجسيم التاو، والميون.[٤] النيوترينوات جسيمات مراوغة إلى حد بعيد بحيث إن «البرهنة» على عدم وجود أنواع أخرى تعد مهمة صعبة، تعتمد على حجج غير مباشرة والكثير من التخمينات. كل ما استطاع الفيزيائيون قوله من التجارب الأرضية وحدها في أوائل ثمانينيات القرن العشرين، هو أنه لا بد أن يكون عدد نكهات النيوترينو أقل من ٧٣٧ نكهة، وناضلوا بعدها عبر السنوات القليلة التالية لينزلوا بهذا العدد إلى ٤٤ نكهة، ثم ثلاثين، وبحلول النصف الثاني من الثمانينات نزلوا بعدد النكهات إلى ست، وذلك بفضل مجهود رئيسي بُذل في المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية (سيرن). على أن كل ما فعلوه هكذا هو إثبات لما كان علماء الكون يعرفونه من قبل.

سبب ذلك هو أن عدد نكهات النيوترينو يؤثر في كمية الهيليوم المنتج في الانفجار الكبير وقت التركيب النووي الأولي. مقدار ما يُنتَج بالضبط من الهيليوم يعتمد على سرعة تمدد الكون وقت التركيب النووي، بحيث

---

[٤] التاو والميون: جسيمان مناظران للإلكترون وأثقل منه، وكلهم معا يسمون باللبتونات. (المترجم)

إنه كلما زادت سرعة تمدد الكون، زاد ما يوجد من الهيليوم (لأنه ستكون هناك عندها فرصة أقل لتلاشي النيوترونات الحرة قبل أن تنحبس في نوى للهيليوم). أحد العوامل التي تؤثر في سرعة التمدد هو عدد الأنواع المختلفة من جسيمات الضوء الموجودة (وجسيماتها المضادة التي يفترض وجودها). يمكنك أن ترى هذا الأمر على أنه نوع من الضغط يساعد على تمدد الكون، حيث يؤدي وجود المزيد من أنواع جسيمات الضوء إلى ضغط أكثر يجعل الكون يتمدد أسرع. تنبئنا حسابات علم الكون أنه مع ما يرصد من مقدار وفرة للهيليوم أقل مباشرة من ٢٥ في المائة كما نراه في النجوم الأكبر عمرًا، لا يمكن أن يوجد في الكون إلا خمسة أنواع مختلفة من جسيمات الضوء وقت التركيب النووي الأولي. اثنان من هذه الجسيمات هما الفوتون والإلكترون، وهذا يترك مكانًا فحسب لثلاثة أنواع من النيوترينو. أي نكهة إضافية توجد من النيوترينو، ستؤدي إلى زيادة كمية الهيليوم بنقطة واحدة في المائة، وهكذا فإن وجود أربع نكهات سيدفع بكمية الهيليوم إلى ما يزيد عن ٢٥ في المائة، وهذا أمر غير وارد بحكم الأرصاد الفلكية. منذ ثمانينيات القرن العشرين غدت تجارب المعجلات فوق الأرض لها القدرة الكافية لأن تحدد نفس هذا العدد لنكهات النيوترينو. حسب هذا المنظور، فإن قياس عدد نكهات النيوترينو هنا فوق الأرض سينبئنا عن مقدار الهيليوم الذي تم صنعه في الانفجار الكبير — وهذا إثبات مذهل، على أن علم فيزياء الجسيمات وعلم الفلك كلاهما يتعاملان مع حقائق أساسية بشأن طبيعة الكون.

الأرصاد الفلكية هي أيضًا أول من أخبر الفيزيائيين بأن النيوترينوات لها كتلة، وذلك من خلال دراسات جرت لشيء أقرب إلينا كثيرًا من الانفجار الكبير — وهو الشمس. وهذا يوفر رابطة أخرى بين الفيزياء بمقاييس المعمل وبين الفيزياء الفلكية وعلم الكون، بما يعزز فكرة أن العلم هو شيء «نعرفه» حقًّا، فيما يتعلق بطريقة عمل العالم.

القصة التي أشرنا إليها في سياق النظريات الموحدة الكبرى في الفصل الثاني، ترجع إلى ما يزيد قليلًا عن أربعين عامًا، أي إلى أوائل الستينيات من القرن العشرين. كان هناك وقتها فريق في معمل بروكهافن القومي برئاسة

راي دافيز، وقد صمم أفراده تنظيمًا لتجربة على عمق ١,٥ كيلومتر تحت الأرض في منجم في ليد بولاية ساوث داكوتا، وذلك للكشف عن جسيمات النيوترينو الآتية من الشمس. كان يلزم دفن التجربة عميقًا هكذا لتجنب تدخل جسيمات الفضاء المعروفة باسم الأشعة الكونية، إلا أنه كان يلزم أيضًا أن تكون التجربة حساسة للغاية، حيث إن النيوترينوات تقاوم إلى أقصى حد التفاعل مع المواد التي لها كثافة عادية. تنساب النيوترينوات خارجة من قلب الشمس دون أن تنحرف في طريقها (وهذا بخلاف الفوتونات التي تتبع مسالك ملتوية متعرجة إلى السطح)، ثم تمر النيوترينوات بمنتهى السهولة حقًّا خلال ١,٥ كيلومتر من الصخر الصلب فوق جهاز الكشف. جهاز الكشف نفسه يبلغ خُمس حجم حمام سباحة بالمقياس الأولمبي، فهو خزان يمتلئ بأربعمائة ألف لتر من مادة بيركلورو إيثيلين Perchloroethylene، وهي سائل يستخدم عادة في عمليات التنظيف الجاف. من المتوقع أن تحدث تفاعلات نادرة بين النيوترينوات الآتية من الشمس وذرات الكلورين في السائل لتنتج ذرات من نظير مشع للأرجون يمكن معرفة عددها بالأجهزة المناسبة.

العمليات التي تجرى في الشمس وتنتج جسيمات النيوترينو تشمل تحويل الهيدروجين إلى هيليوم، بما يذكّر بعملية التركيب النووي الأولية في الانفجار الكبير. عملية الاندماج هذه تطلق طاقة — هي التي تُبقي الشمس ساطعة — وتطلق أيضًا النيوترينوات. في استطاعتنا أن نقيس مقدار الطاقة التي تنساب خارجة من الشمس، ونحن نعرف من دراسات المعمل مقدار الطاقة الناتجة عن صنع نواة هيليوم واحدة، ومن ثم فإننا نستطيع أن نحسب مقدار التفاعلات النووية التي تحدث في كل ثانية ومقدار ما ينتج عن ذلك من النيوترينوات. تخبرنا الحسابات بأن هناك سبعة مليارات من النيوترينوات من النوع الذي يستطيع التفاعل مع ذرات الكلورين على النحو المناسب؛ تمر كل ثانية من خلال كل سنتيمتر مربع من الأرض (بما في ذلك جهاز الكشف). إلا أنه بسبب من الضعف البالغ في تفاعل النيوترينوات مع المواد التي لها كثافة عادية، فقد تنبأت الحسابات بأنه سيتم الكشف عن خمسة وعشرين فقط من جسيمات النيوترينو في كل «شهر» في منجم

هومستيك. الحقيقة أنه بمرور عقود كثيرة من السنين سجلت التجربة فحسب انسياب ثُلث العدد المتوقع من النيوترينوات، بمعدل ثمانية أو تسعة جسيمات في كل شهر بدلًا من الخمسة والعشرين.

منذ ستينيات القرن العشرين سجلت كشافات أخرى من أنواع مختلفة النتائج نفسها. كما أن هناك تجارب تتناول انسياب النيوترينوات الناتجة بواسطة المفاعلات النووية أو بواسطة الأشعة الكونية، التي تتفاعل مع الذرات في الجو (وهي هنا ليست بعد نيوترينوات إلكترون فحسب، وإنما هي من أنواع أخرى أيضًا)، وقد بينت هذه التجارب تضاربات فيما بين أعداد النيوترينوات الناتجة في المفاعلات أو بواسطة الأشعة الكونية وما بين تلك التي تسجلها الكشافات. التفسير الوحيد الممكن لهذا التضارب هو أن النيوترينوات يتم إنتاجها بالأعداد المتوقعة، ولكنّ هناك شيئًا ما يحدث لها وهي في طريقها إلى الكشافات.

النيوترينوات الناتجة عن التفاعلات في قلب الشمس كلها من نوع نيوترينوات الإلكترون، والكشافات التي تستخدم في النموذج الأولي من دراسات نيوترينوات الشمس تستطيع فقط الكشف عن نيوترينوات الإلكترون. إلا أنه من الواضح الآن أن هذه النيوترينوات وهي تنتقل خلال الفضاء تتغير إلى أنواع أخرى من النيوترينو (نيوترينو التاو والميون) ثم تعود ثانية إلى نيوترينوات إلكترون. تسمى هذه العملية بتذبذب النيوترينو، وهي تعني أننا عندما نبدأ بحزمة من نيوترينوات إلكترون خالصة (أو في الحقيقة عندما نبدأ حتى بأي نوع خالص من الأنواع الأخرى) فإننا سرعان ما ننتهي إلى حزمة يتكوّن ثلثها من نيوترينوات الإلكترون، وثلث آخر من نيوترينوات التاو، وثلث من نيوترينوات الميون. هذه العملية لها علاقة بالظاهرة الكمومية لثنائية الموجة-الجسيم، وهي ليست مجرد حيلة تُشد خارج قبعة الساحر لتفسر لغز النيوترينو الشمسي — الذبذبات من هذا النوع معروفة جيدًا من قبل من دراسات لجسيمات تسمى الكاوونات[5] Kaons، وذلك قبل إدخالها في تفسير أرصاد النيوترينوات. على أن هذه

[5] الكاوون، أحد الجسيمات تحت الذرية أو الميزونات التي يقل وزنها عن البروتون. (المترجم)

الذبذبات لها ملمح مهم أقصى الأهمية. فهي لا يمكن أن تحدث إلا لجسيمات لها كتلة. وبكلمات أخرى، فإن تلك القياسات التي تُجرى في خزان يحوي سائل تنظيف أسفل منجم في ساوث داكوتا تخبرنا بأن هذه الجسيمات الموجودة في كل مكان وزمان في الكون، جسيمات النويترينو، لا بد أن لها كتلة. ربما تكون كتلة كل نيوترينو واحد صغيرة جدًّا، ولكنها لا يمكن أن تكون صفرًا.

قد تظن، كما فعل علماء فلك كثيرون لمدة زمنية، أن هذا فيه الحل للغز الكتلة «المفقودة» في الكون. إلا أنه سرعان ما ثبت أن إرجاع كل الكتلة المفقودة إلى النيوترينوات لن يكون صوابًا. قد تكون النيوترينوات مظلمة ولكنها كنوع من المادة المظلمة تعد النوع الخطأ لتفسير أصل النمط المرصود من المادة اللامعة في الكون. أشرنا من قبل إلى نوعين من المادة المظلمة يعرفان بأنهما المادة المظلمة «الساخنة»، و«الباردة». النيوترينوات ساخنة، بمعنى أنها تتحرك فيما حولها بسرعة من كسر له قدره من سرعة الضوء. أما ما نحتاجه لتفسير نمط مجرات السماء فهو كم غزير من جسيمات من المادة المظلمة الباردة بطيئة الحركة.

دعنا نتذكر هنا أن اللغز الذي يجب أن نفسره هو كيف أن تموجات بالغة الصغر تصل إلى زيادة للكثافة هي فحسب من جزء واحد من المائة ألف في توزيع الباريونات في الكون المبكر، كيف أن هذه التموجات تنامت لتغدو حاليًّا مجرات وحشودًا عنقودية من المجرات، مع أن الكون يواصل التمدد ويحاول مطها لتكون أقل سمكًا. النمط الذي تصنعه الخامة اللامعة للمجرات بالمقاييس الكبرى يشبه النمط داخل الإسفنج الطبيعي، فتوجد فيه ثقوب (أي مناطق تخلو من المجرات اللامعة) محاطة بفقاعات من خامة لامعة في شكل صفحات وخيوط دقيقة مصنوعة من التجمعات العنقودية وفوق العنقودية للمجرات. من الممكن أن يتم صنع هذا النوع من البنية في كون تسيطر عليه جذبويًّا المادة المظلمة الساخنة، إلا أن المشكلة هي أن ذلك سوف يستغرق زمنًا طويلًا جدًّا. الجسيمات ذات السرعة العالية التي لها ما يكفي من الكتلة عندما تنبثق عن الانفجار الكبير ستؤدي إلى بعثرة تكتلات المادة الباريونية بالكفاءة نفسها التي تبعثر بها كرة البولينج قوارير

الخشب أثناء ضربة لها، وسوف تؤدي إلى جرف الباريونات في صفحات وخيوط دقيقة حول أطراف المناطق الخاوية من الفضاء. لا تتوقف هذه العملية إلا عندما تبطئ سرعة النيوترينوات (أي «تبرد») إلى ما يقرب من عُشر سرعة الضوء، وعندها فقط تبدأ الصفحات الكبيرة من الهيدروجين والهيليوم في أن تنقسم وتتقلص بتأثير شد الجاذبية، لتشيد في «النهاية» النجوم والمجرات في عملية تتجه من «أعلى إلى أسفل».

على أن عبارة «في النهاية» هي العبارة المفتاح. العملية كلها تستغرق على الأقل أربعة مليارات عام، ولكننا نعرف أن الكون عمره فحسب أربعة عشر مليار عام، وأن هناك نجومًا عمرها أكبر من عشرة مليارات عام حتى في مجرتنا نحن، في حين أن أبحاث المسح العميقة مثل ما في المجال الفائق العمق لهابل تبين أن المجرات الصغيرة (وليست الكبيرة) قد تكونت بالفعل بعد الانفجار الكبير بمليار واحد من السنين. سيثبت هكذا في النهاية أن علماء الفلك سينالهم الارتباك بالفعل لو كانت كتلة النيوترينو تزيد عن مقدار صغير «جدًّا» — إلا أن التجارب تطرح لحسن الحظ أن كتلة النيوترينو هي حقًّا بالغة الصغر إلى حد أصغر من أن تفرض معه أي مشكلة بالنسبة لنماذج تشكيل المجرات.

السبب في أن النيوترينوات لا بد أن تكون لها كتلة حتى تتذبذب هو أن السرعة التي تحدث عندها الذبذبة تعتمد على «الاختلاف» في الكتلة بين أنواع النيوترينو المختلفة. لو كانت كتل النيوترينوات صفرًا، لما كان هناك أي اختلاف فيما بينها. بما أن سرعة الذبذبة تعتمد على الاختلاف في الكتلة، فإن المسافة التي تنتقل بها النيوترينوات قبل أن تمتزج بالكامل في كميات متساوية لكل من الأنواع الثلاثة المختلفة تعتمد هي أيضًا على الاختلاف في الكتلة. دراسات النيوترينو الشمسي وحدها لا تخبرنا بالكثير بهذا الشأن، لأن المسافة من الأرض إلى الشمس مسافة بالغة الكبر حتى إن الضوء ليستغرق ٨٫٣ دقيقة لينتقل من الشمس إلى الأرض، وتستغرق النيوترينوات في ذلك زمنًا أطول قليلًا. يعد هذا زمنًا هائل الطول بالنسبة لمعايير معظم تفاعلات الجسيمات، وهو زمن يكفي لأن يحدث الامتزاج كاملًا. إلا أن دراسات النيوترينوات التي تنتجها الأشعة الكونية في الجو،

وهي نيوترينوات تستغرق فقط جزءًا من الثانية للوصول إلى الكشافات، هذه الدراسات تفرض قيودًا أشد صرامة. لا تستطيع هذه الدراسات أن تخبرنا مباشرة عما تكونه كتل الأنواع المنفردة من النيوترينو، ولكنها تستطيع أن تعطينا ما يدل على الكتلة الكلية لكل الأنواع الثلاثة من النيوترينو، بافتراض أنها تسلك بطريقة مماثلة للجسيمات الأخرى الأسهل في دراستها مثل الكاوونات. إذا ترجمنا هذا إلى الإسهام الكلي للنيوترينوات في كثافة الكون، فإنه يخبرنا بأن النيوترينوات تساهم على الأقل بنسبة ٠,١ في المائة من الكتلة اللازمة لجعل الكون مسطحًا.

من الجانب الآخر فإن نوع البنية الذي نراه الآن في الكون، وطول الزمن الذي بقيت فيه هذه البنية يخبرنا بأن إسهام «كل» أنواع المادة المظلمة الساخنة في كثافة الكون لا يزيد عن ١٣ في المائة من كتلة الباريونات — وبكلمات أخرى، وعلى وجه التقريب، فإن هذا لا يزيد عن ٠,٥ في المائة من الكثافة الكلية اللازمة للتسطح. في هذا اتفاق مُرضٍ بين أرصاد أصغر الأشياء وأخفها في الكون وأرصاد أكبر البنى في الكون. سيكون الأمر مربكًا تمامًا لو أن فيزياء الجسيمات قالت إن جسيمات النيوترينو لا بد أن تسهم على الأقل بمقدار ٠,٥ في المائة من كثافة التسطح، في حين تقول دراسات المجرات إن إسهامها لا يمكن أن يزيد عن ٠,١ في المائة، إلا أن الحال هو عكس ذلك. لا داعي لزيادة التأكيد على أن هذا النوع من الاتفاق في النتائج هو دليل قوي على أن علماء الفيزياء يعرفون ما يتحدثون عنه، حتى وإن كانت الأرقام لا تتماثل بالضبط.

عندما نترجم هذا إلى لغة من وحدات الطاقة والكتلة، فسنجد أنه عندما يكون لدينا نيوترينو واحد من كل من الأنواع الثلاثة المختلفة فإن كتلتها الكلية سيكون مجموعها أقل من ٢ إلكترون فولت، بما يساوي ٠,٠٠٠٤ في المائة من كتلة إلكترون واحد. ومن ثم فإننا «نعتقد» أن جمع كتل كل أنواع النيوترينو الثلاث معًا يسهم بما يقرب من ٠,١ إلى ٠,٥ في المائة من الخامة الجذبوية اللازمة لجعل الكون مسطحًا، ولا يزال علينا أن نفسر ٩٥ في المائة من الخامة الجذبوية في الكون. الخطوة الأولى هي أن ننظر في الطريقة التي تلعب بها المادة المظلمة «الباردة» دورًا في تنامي الكون كما

نراه الآن — ولكن بدون أن نقلق، في وقتنا هذا، بشأن ما تكونه بالضبط جسيمات هذه المادة الباردة، حيث إننا نجد بهذا الشأن أن علم الكون هو الذي أتى أولًا وأخبر علماء فيزياء الجسيمات بما عليهم أن يبحثوا عنه.

يختبر علماء الفلك أفكارهم عن تنامي البنية في الكون بأن يقارنوا بين أرصاد الأنماط التي يتابعونها في السماء للمجرات وحشود المجرات العنقودية وبين تنبؤات محاكيات تنامي رقع اللاتناسقات كنتيجة للشد الجذبوي في كون يتمدد. عندما تُذكر المسائل على هذا النحو المجرد، فإنها تبدو وكأنها أمور بسيطة. على أن الأرصاد ستتطلب قياس الإزاحات الحمراء لمئات الآلاف من مجرات أبهت للغاية من أن تُرى بالعين المجردة، توجد في رقع مختلفة من السماء. لا يمكن أن تغدو هذه الدراسات التفصيلية قابلة لتنفيذها عمليًا إلا باستخدام التكنولوجيا الرقمية — تكنولوجيا «الأجهزة المقرونة الشحن» لالتقاط «الصور الفوتوغرافية» للمجرات، واستخدام الكمبيوترات لتحليل البيانات — وهي تكنولوجيا جرى تطبيقها في نهاية القرن العشرين وبداية القرن الحادي والعشرين. تُحوّل قياسات الإزاحات الحمراء إلى مسافات لبناء خريطة ثلاثية الأبعاد لقطاع وتدي أو مخروطي من الكون يمتد خارجًا من نقطة رؤيتنا. حتى يومنا هذا لم يتم إجراء ذلك بالنسبة لكل السماء، إلا أن الأرصاد المختلفة لرقع من السماء تتباعد مسافات واسعة تعطينا النوع نفسه من صورة تكون عمومًا رغوية، ومن ثم فإننا واثقون من أن هذه الشرائح تمثل المشهد المعتاد للكون.

محاكيات الكمبيوتر هي بلا شك الأصعب. إذا كان لديك كمبيوتر كبير إلى حد كاف (أي كمبيوتر له ذاكرة كبيرة بما يكفي)، فستتمكن من أن تمثل كل مجرة في نموذج للكون المبكر على أنها جسيم دقيق يتميز بمجموعة من الأرقام، وتُدخل معادلات أينشتاين لتمدد الكون وقانون الجاذبية، ثم تطلق النموذج في ظروف بدايات مختلفة وكميات مختلفة من المادة المظلمة الباردة لترى أيًا من ذلك سوف ينتهي إلى ما يشبه الكون الحقيقي. مع وجود العديد من مئات المليارات من المجرات المعروفة يصبح من الواضح أن من المستحيل تطبيق ذلك على كل هذا العدد. بدلًا من ذلك يناظر كل «جسيم» في هذه المحاكاة ما يقرب من مليار مثل كتلة الشمس. استُخدم في أكبر هذه

المحاكيات عشرة مليارات من الجسيمات الافتراضية لتحاكي سلوك الكون المرئي بأكمله وهو يتمدد.[٦] عندما نبدأ المحاكاة بهذه الجسيمات وقد توزعت إحصائيًّا بنفس طريقة توزيع المادة عند وقت إعادة الاتحاد، سنجد أن نماذج الكمبيوتر تستطيع أن تخطو بعدها قدمًا في الزمن الافتراضي لنرى كيف تحتشد الجسيمات معًا عنقوديًّا. عندما تبدو الأمور مثيرة للاهتمام، يمكن عندها أن تُركز المحاكاة على أحد التجمعات العنقودية وهي تتشكل، مع تجاهل باقي نموذج الكون، وتعاد معايرة هذا التجمع لاستخدام العدد نفسه من الجسيمات الافتراضية لسبر تنامي البنية بالمقاييس الصغيرة داخل هذا التجمع العنقودي. يمكن من حيث المبدأ أن تستمر هذه العملية حتى الوصول في النهاية إلى تشكيل المجرات المفردة، إلا أن هذا فيه ما يضغط على تكنولوجيا الكمبيوترات الحالية إلى أقصى حد لها.

هذه الدراسات هي مثل الأبحاث الحديثة، تتجاوز القدرات الفردية. أكبر هذه المحاكيات قد نفذتها مجموعة دولية من العلماء، سميت مجموعة اتحاد فيرجو، وقد سميت هكذا على اسم أقرب مجموعة مجرات كبيرة عنقودية في الكون، وتقع في اتجاه كوكبة «فيرجو أو العذراء»، وإن كانت تتجاوزها بعيدًا. تتواصل الحسابات باختيار إحدى نقاط الكتلة الافتراضية وحساب التأثير الجذبوي عليها بفعل النقاط الأخرى التي يبلغ عددها ٩٩٩٩٩٩٩٩٩٩، ثم يتم اختيار نقطة أخرى ويجرى عليها الأمر نفسه، ونظل نكرر ذلك ثانية المرة بعد الأخرى حتى يتم الحساب لكل نقطة. يجرى في المحاكاة تحريك كل نقطة تحريكًا هينًا بما يتفق مع كل القوى الجذبوية، «الكون» يتمدد تمددًا ضئيلًا، وتظل العملية كلها تتكرر ثانية.

إلا أنه حتى نصل إلى التقدم في البحث في وقت معقول (بمعنى أن يكون ذلك قبل موت الباحثين بحكم السن الكبير)، لا بد من استخدام بعض المسارات المختصرة. مثال ذلك، أنه بالنسبة للنقاط التي تتباعد تباعدًا

---

[٦] ستخبرنا عملية حسابية سريعة أنه حتى تلك البلايين العشرة من هذه الجسيمات سيكون حاصل جمعها فحسب ٠,٠٠٣ في المائة من كتلة الكون المرئي. ليس لهذا أهمية بالغة، لأن الكون قريب جدًّا من أن يكون متنظمًا ومتجانسًا بمقاييسه الأكبر. وبطريقة مماثلة، فإن خريطة حقل ذرة مزروع بانتظام واتساق لن تتطلب إلا إظهار كل جزء من مائة من أعواد الذرة لتعطينا فكرة جيدة عما يبدو عليه الحقل، وذلك لأن صفوف الذرة متناسقة.

كافيًا، تجمّع المحاكاة آلاف الجسيمات المنفردة وتستخدم تأثيرها الجذبوي الكلي لحساب التأثير في جسيم على الجانب الآخر من نموذج الكون، بدلًا من إجراء حساب لكل إسهاماتها المنفردة. يستخدم في هذه المحاكاة مجموعة من كمبيوترات «يونيكس» تتضمن ٨١٢ معالجًا لها ذاكرة من التيرابايتات[٧] تؤدي ٤٫٢ تريليون عملية حسابية في كل ثانية (٤٫٢ تيرا فلوب). على أنه حتى بهذه السرعة، يستمر العمل على النموذج طيلة أسابيع في كل مرة ليؤدي إلى نتائج. بحلول منتصف ٢٠٠٤، أنتجت المحاكاة ٢٠ تيرا بايت من البيانات تمثل ٦٤ لقطة للكون الافتراضي في مراحل مختلفة من تناميه — إزاحات حمراء مختلفة، تنظر إلى الوراء في الزمان ابتداء من وقتنا الحالي. عندما نقارن هذه اللقطات بالأنماط التي تصنعها المجرات اللامعة في خرائط الإزاحات الحمراء للكون الحقيقي سيبين لنا ذلك بوضوح أنه لا بد من وجود كمية لها قدرها من المادة المظلمة حتى تفسر نوع البنية التي نراها في الكون الحقيقي.

لا تجرى هذه المقارنات بالطبع بواسطة العين، حتى وإن كانت النظرة العارضة لنوعي الخريطتين توفر لنا بالفعل انطباعًا مذهلًا بتماثلهما. بدلًا من ذلك تُجرى مقارنات إحصائية بين أنواع الصفحات والخيوط الدقيقة والفراغات التي تُرى في محاكيات الكمبيوتر (ساعدتنا إحداها في عمل الصورة المستخدمة في الغلاف الورقي لهذا الكتاب)، وبين أنواعها في الكون الحقيقي، وتعطينا هذه المقارنات قياسًا موضوعيًّا عن مدى جودة التوافق بين هذه المحاكيات والواقع. الإجابة أنها بالغة الجودة حقًّا — «بشرط» وجود كميات وافرة من المادة المظلمة وأن يكون الكون مسطحًا.

على الرغم من أنه تم تنفيذ محاكيات مختلفة كثيرة فيها مقادير مختلفة من المادة المظلمة، وقيم مختلفة من كثافة الكون والانحراف عن التسطح، وما إلى ذلك، فإنه لا داعي لأن نتفحصها كلها، حيث إن واحدة منها فقط تتوافق حقًّا مع الكون الذي نعيش فيه. ولكن هذا لم يكن مجرد تخمين محظوظ، ونحن لا نود لك أن تعتقد أن علماء الفلك قد شدوها عشوائيًّا من

[٧] التيرابايت: ترليون بايت، والبايت Byte وحدة قياس من ٨ بتات Bit. (المترجم)

القبعة ثم وجدوا أنهم مصيبون، الوصول إلى هذه النتيجة تطلب البدء من بدايات كثيرة زائفة، والرجوع بالمسار خارج ممرات مسدودة. النموذج الذي لدينا الآن هو أحسن ما حصلنا عليه، وهو أحسن ما يوجد من فهم للكون، ولكنه تطلب عقودًا من العمل، فيها ما يذكّرنا بالطريقة التي تطورت بها الطائرة النفاثة الحديثة من أول طائرة للأخوين رايت.

يتأسس هذا النموذج على فكرة أن الباريونات مغمورة في بحر من المادة المظلمة الباردة. سوف نقول المزيد عن طبيعة المادة المظلمة الباردة في الفصل التالي، إلا أن ما يهمنا هنا هو أنها مما يلزم لعلم الكون، وأنها فيما يبدو تكون في شكل جسيمات لا تتفاعل مع المادة الباريونية بأي طريقة إلا من خلال الجاذبية. نحن لا نستطيع التأكد من عدد ما يوجد من هذه الجسيمات، أو ما قد تكونه كتلة الجسيم الفرد (أو حتى إن كانت موجودة بأكثر من نوع واحد)، إلا أنه يمكن التخمين على نحو معقول بأن لها نفس النوع من كتلة البروتونات والنيوترونات. تبين محاكيات الكمبيوتر أن هذه الجسيمات تنتشر خلال الكون بأسره، بما في ذلك الفراغات بين فقاعات التجمعات العنقودية اللامعة للمجرات. لا بد أيضًا من وجود باريونات مظلمة في هذه الفراغات، وذلك لأنه حتى نجعل المحاكيات تتفق مع الكون الحقيقي علينا أن نفترض أن الباريونات وجسيمات المادة الباردة المظلمة تمتزج فيما بينها عبر الكون. نحن نرى فحسب نمطًا رغويًا للمجرات اللامعة لأن المجرات اللامعة تتكون فحسب في مناطق تكون فيها للمادة المظلمة كثافة أكبر قليلًا، تؤدي إلى شد الغاز الباريوني القريب منها في ثقوب وعائية جذبوية حيث تكون سحب الغاز قد أصبحت بالكتلة الكافية لأن تتقلص لتكوّن النجوم والمجرات. يعني هذا أن توزيع الخامة اللامعة يعطينا منظرًا للكون فيه تحيز إلى حد ما، حيث تتوزع المادة فعلًا في تناسق أكثر قليلًا من الخامة اللامعة. إلا أن هذا التحيز يكون بقدر صغير تمامًا — إذا كان الحال، كما يبدو، هو أنه حتى يكون متوسط كثافة المادة في الكون كافيًا تقريبًا لأن يسبب تقلص سحب الغاز، فإنه لا يحتاج إلا إلى موجة صغيرة نسبيًا من كثافة إضافية لبدء هذه العملية.

تظهر أيضًا العلاقة الوثيقة بين المادة الباريونية والمادة المظلمة الباردة من الدراسات التي أجريت على المجرات المفردة مثل درب التبانة. دراسات

المجرات هي التي أعطت في الحقيقة لأول مرة الإشارة إلى أن هناك في الكون ما هو أكثر مما تتلقاه العين، وإن كان معظم علماء الفلك قد ظلوا لسنين كثيرة يقاومون تقبل هذه الإشارة.

هيا نرجع إلى ثلاثينيات القرن العشرين، في وقت يتلو فحسب بعقد من السنين أو ما يقرب، إدراك الفلكيين أن بعض رقع الضوء المضببة التي ترصدها تلسكوباتهم هي مجرات أخرى وراء درب التبانة، ووقتها لاحظ فريتز زويكي عالم الفلك السويسري شيئًا مميزًا يتعلق بحشود المجرات العنقودية. وجد أنه في كثير من الحالات، تتحرك المجرات في هذه الحشود العنقودية بسرعة أكبر من أن تبقى حشود المجرات معها متماسكة معًا بالشد الجذبوي لكل النجوم اللامعة في كل مجرات الحشد العنقودي. إذا كانت هذه الأرصاد صحيحة، فإنه لا يمكن للحشود العنقودية أن تبقى مستقرة، وإنما كان ينبغي أن تستمر في التبخر بمقياس زمني سريع نوعًا، حسب المعايير الفلكية. في ذلك الوقت، كانت هناك فكرتان جديدتان هما فكرة المجرات الخارجية، وفكرة استخدام إزاحات دوبلر (و«ليس» الإزحات الحمراء الكونية) لقياس السرعات التي تتحرك بها هذه المجرات، ولم يكن سوى قلة من الأفراد قد أخذوا بنتائج زويكي بمعناها الظاهري. ولكننا إذا تقبلناها بالفعل فإنها تتضمن أنه حتى تكون حشود المجرات العنقودية مستقرة (أو «مربوطة جذبويًا») يجب أن تكون هناك مادة جذبوية في الحشود العنقودية الكبيرة مقدارها أكبر بعدة مئات من المرات عما يوجد في شكل نجوم لامعة. أشار زويكي إلى هذه المادة غير المرئية على أنها «مادة مظلمة (باردة) [dunkle (kalte) materie]». حتى لو أُخذت بالفعل هذه النتائج مأخذًا جديًا، فإنه لم يكن هناك وقتها سبب للاعتقاد بأنه لا يمكن أن يوجد مثل هذا القدر الكبير من المادة الباريونية المظلمة فيما حولنا في شكل سحب باردة من الغاز أو نجوم شاحبة جدًا، ومن ثم لم يكن في الأمر ما يزعج كثيرًا. على الرغم من أن إمكان وجود مادة مظلمة قد أُقر به منذ ما يقرب من سبعين سنة، إلا أن هذا لم يكن سببًا للقلق إلا بعد أن أدى تنامي فهمنا للتركيب النووي في الانفجار الكبير في ستينيات القرن العشرين إلى وضع قيود على مقدار ما يوجد حولنا من المادة الباريونية. وعندها، بعد

بحث زويكي الرائد بما يقرب من أربعين سنة، أي في سبعينيات القرن العشرين، أخذ يبزغ تنويع آخر على لحن المادة المظلمة.

في ذلك الوقت، كان باحثون عديدون يدرسون الطريقة التي تدور بها المجرات القرصية مثل مجرتنا درب التبانة. كما يدل اسم هذه المجرات القرصية، فإنها منظومات مسطحة للنجوم، أقراص تدور ولها نتوء مركزي، ولها تقريبًا نسب مقاييس تماثل تقريبًا البيضة المقلية، ولكن أقطارها تقاس عادة بمائة ألف سنة ضوئية، وهي تحوي مئات المليارات من النجوم المفردة. تدور المنظومة كلها كالعجلة بما يشبه عجلة كاترين المتمهلة،[8] ويستغرق الدوران مائتي مليون سنة لنجم مثل الشمس (على بعد ثلثي المسافة خارج مركز مجرتنا) ليكمل مدارًا واحدًا حول المركز. عندما ننظر إلى هذه المجرات عند حافتها، يمكننا أن نقيس سرعة دورانها باستخدام ظاهرة دوبلر. سيكون أحد جانبي القرص آتيًا تجاهنا، ومن ثم فإن ضوءه يُظهر إزاحة زرقاء، بينما يتحرك الجانب الآخر بعيدًا عنا، ومن ثم فإن ضوءه يظهر إزاحة حمراء. يكشف حجم الإزاحة عن السرعة التي يتحرك بها القرص. بحلول سبعينيات القرن العشرين كانت التكنولوجيا على درجة من الكفاءة بحيث يمكن في حالات كثيرة قياس سرعة حركة أجزاء مختلفة من مجرة كهذه على مسافات مختلفة من المركز. وأتت النتائج بمفاجأة كبيرة.

لو كانت كتلة إحدى المجرات القرصية تتوزع بالطريقة نفسها مثل النجوم اللامعة، فإن النجوم الأبعد من المركز ستتحرك في مداراتها بسرعة أقل لأنها أكثر بعدًا من تركز الكتلة في النتوء المركزي، أو النواة. وبالطريقة نفسها، فإن الكواكب الخارجية في منظومتنا الشمسية مثل المشتري وزحل ستتحرك في مداراتها ببطء أكثر من الكواكب الداخلية مثل الزهرة والأرض، لأنها على مسافة أبعد من تركز الكتلة في الشمس. إلا أنه في كل حالة تقريبًا تبين لنا أرصاد المجرات القرصية أنه باستثناء المناطق الداخلية القصوى من المجرة موضع الدراسة، فإن سرعة الدوران تتماثل بالنسبة للنجوم البعيدة في الخارج عند حرف القرص هي والنجوم التي تدور قريبة من

[8] عجلة كاترين: عجلة كانت تستخدم في القرون الوسطى لتعذيب المتهمين دينيًا، حيث يشدون إليها وتدار العجلة في بطء مع شد أطرافهم. والعجلة سميت باسم قديسة الإسكندرية في القرن الرابع كاترين. (المترجم)

النتوء المركزي، وكذلك في كل النقط فيما بينهما. التفسير الوحيد الذي يمكن تطبيقه على ذلك هو أن المجرات القرصية مغمورة داخل هالات ضخمة من المادة المظلمة، تحوي على الأقل مادة مقدارها عشرة أمثال ما يوجد في القرص نفسه، وهذه المادة المظلمة تبقى القرص في قبضتها الجذبوية. يبين هذا مباشرة وجُود مادة مظلمة مصاحبة للمجرات المفردة، في حين أن دراسات الحشود العنقودية التي كان زويكي رائدًا لها تبين أنه لا بد أن توجد أيضًا مادة مظلمة إضافية في الفجوات بين المجرات.

في السنوات الأولى من القرن الحادي والعشرين وجد العلماء أدلة أكثر مباشرة على وجود تلك السحب من المادة المظلمة بين المجرات. دعنا نتذكر أن ما يقرب من خُمس واحد فقط من عدد الباريونات التي نتجت في الانفجار الكبير هو ما يمكن لنا الآن رؤيته في شكل نجوم ومجرات لامعة. لا بد أن باقي الباريونات موجودة في مكان ما حولنا، في سحب الغاز بين النجوم والمجرات أو في نجوم شاحبة. مر زمن طويل دون أن يعرف أحد مكانها بالضبط، إلا أنه بدا كتخمين طبيعي أن المادة الباريونية المظلمة غير مرئية لأنها باردة. على أنه ثبت في النهاية أن هذا التخمين هو بالضبط خطأ. هذه المادة غير مرئية لأنها ساخنة.

تحدَّد موقع المادة الباريونية «المظلمة» بواسطة أرصاد الأقمار الصناعية التي أجريت في الجزء فوق البنفسجي من الطيف، وهو جزء غير مرئي لأعيننا. كشفت هذه الأرصاد عن أن مجرتنا هي وجيرانها (في نوع من حشد عنقودي مصغر يسمى المجموعة المحلية للمجرات) مغمورة في ضباب هائل من غاز ساخن ما بين المجرات، في الشكل المألوف من الهيدروجين والهيليوم. على الرغم من أن هذا الغاز رقيق جدًّا بالمقاييس الأرضية، فإنه ساخن جدًّا، بمعنى أن ما فيه من الجسيمات تتحرك بسرعة كبيرة جدًّا وتصدر إشعاعًا بموجات قصيرة، تتجاوز الطرف الأزرق من الطيف المرئي، أي في الجزء فوق البنفسجي. لو كان لدينا أعين فوق بنفسجية، لرأينا ذلك كشيء مضبب من مادة لامعة ساخنة تغطي السماء كلها وبدرجة حرارة تقرب من ١٠–٢٠ مليون كلفن (١-٢ كيلو إلكترون فولت). هناك كتلة تساوي ما يقرب من ترليون مثل كتلة الشمس في هذه الخامة الساخنة التي تحيط

«بالمجموعة المحلية»، وتماثل تقريبًا أربعة أمثال الكتلة في الخامة اللامعة في المجرات، وتتوافق توافقًا رائعًا مع فهمنا للتركيب النووي في الانفجار الكبير. إلا أن هذا لا يزال يترك مجالًا للكثير من المادة الباردة المظلمة. هكذا نجد أن هناك أدلة ظهرت نتيجة سرعة حركة المجرات وتبين أن الحشود العنقودية تبقى متماسكة معًا بواسطة المادة المظلمة، وبمثل ذلك تمامًا نجد أن هذه السحابة الساخنة من الغاز لا يمكن أن تبقى في مكانها إلا بواسطة مادة مظلمة باردة. الغاز الساخن مغمور في المادة المظلمة الباردة ويوفر لنا علامة واسمة لتتبع المادة المظلمة، مثلما توفر لنا أضواء الزينة علامة لتتبع الخطوط الخارجية لشجرة الكريسماس.

تم تحديد سحب مماثلة من الغاز الساخن تحيط بمجرات أخرى في حشود عنقودية أخرى. تطرح الأدلة أن الغاز يبقى ساخنًا بواسطة تفجرات من مادة ذات طاقة نشطة تقذف خارجًا بواسطة المراكز النشطة لبعض المجرات، ويتم الكشف عنها كمصادر راديو ذات طاقة نشطة ربما تكون مصاحبة لثقوب سوداء ذات كتلة فائقة. ربما يكون الغاز قد جُعل أيضًا ساخنًا من الأصل بفعل موجات لصدمات تنتج عن الارتطام بين سحب الغاز في الكون المبكر، في زمن لا يتأخر كثيرًا عما بعد وقت إعادة الاتحاد.

بطريقة أو أخرى، فإنه بحلول الوقت الذي أظهرت فيه محاكيات الكمبيوتر لتنامي بنية كل الكون المرئي أن هناك حاجة لوجود مادة مظلمة باردة، لم يكن هذا فيه بعد أي مفاجأة حقيقية. على أنه لا يزال هناك لغز واحد رئيسي يتطلب حلًّا.

ينبئنا فهمنا للتركيب النووي الأولي بأن نسبة تقرب من ٤ في المائة من الكتلة اللازمة لجعل الكون مسطحًا موجودة في شكل باريونات (منها أقل من ١ في المائة في شكل جسيمات نيوترينو)، ونحن نعرف من الأرصاد أن حوالي خُمس ذلك (أي أقل من ١ في المائة مما يتطلبه التسطح) يكون في شكل خامة لامعة. عند مقارنة النمط الذي يصنعه توزيع الخامة اللامعة في الكون حاليًّا مع الأنماط التي تصنعها محاكيات الكمبيوتر تخبرنا هذه المقارنة بأن المقدار الكلي للمادة في الكون يقترب من ٣٠ في المائة من المادة اللازمة للتسطح — وبكلمات أخرى، ما يقرب من ٢٦ في المائة من كتلة

التسطح، ما بين ستة وسبعة أمثال الكتلة الموجودة في شكل باريونات، يوجد في شكل مادة مظلمة باردة. أي إضافة لأكثر من ذلك، ستؤدي لأن يغدو النمط الذي تصنعه الخامة اللامعة أكثر تكتلًا، أي نقص لأقل من ذلك سيجعل النمط أقل تكتلًا.

إلا أن التوليف بين محاكيات الكمبيوتر وبين دراسات أشعة خلفية الكون الميكروويفية ينبئنا بأن الكون مسطح. إحدى الطرائق لفهم ذلك هو إدراك أن معدل سرعة تمدد الكون يؤثر أيضًا في مدى تكتله حاليًا. لو كان الكون مفتوحًا، فإنه سيتمدد بسرعة أكبر، وتمتط المادة لتصبح أكثر رقة في سمكها بسرعة أكبر، ولن يكون هناك الوقت الكافي لظهور بنى كبيرة مثل التي نراها وقد تشكلت بعد الانفجار الكبير، ومن الناحية الأخرى لو كان الكون مغلقًا، فإن سيتمدد بسرعة أبطأ، وسوف تتكتل المادة معًا بسهولة أكبر، ويصبح الكون أكثر تكدسًا عما نراه الآن بالفعل.[٩] هذا هو اللغز — ما الذي يجعل الكون مسطحًا، إذا كان ٣٠ في المائة فقط من كتلة التسطح يوجد في شكل مادة؟ سيتم تفسير حل هذا اللغز في الفصل التالي، ولكن هاكم أولًا ملخص ما نعتقده عن طريقة تطور البنية في الكون وهو يتمدد مبتعدا عن زمن إعادة الاتحاد.

نحن نعرف أن تركزات المادة الباريونية لا يمكن أن تكون قد بدأت في التنامي إلا بعد إعادة الاتحاد، وذلك لأن التفاعلات التي تحدث بين الجسيمات المشحونة وفوتونات إشعاع الخلفية التي لا تزال فوتونات ساخنة، هي تفاعلات ستمنع حدوث التقلص قبل هذا الوقت. ولكننا نعرف أيضًا أن المادة المظلمة لا بد أن تكون قد تركزت في تكتلات بحلول ذلك الوقت بسبب السرعة التي تقع بها بالفعل المادة الباريونية داخل الثقوب الوعائية الجذبوية بمجرد أن تحبس في ذرات متعادلة كهربائيًا. الحقيقة أن إحدى المفاجآت في أوائل القرن الحادي والعشرين هي أنه مع تحسن التكنولوجيا

---

[٩] مهما كنت في حال من التعجب من ذلك، فلن تستطيع التخلص من تغير في سرعة التمدد وتغير في مقدار المادة المظلمة للحصول على أي «حل راسخ» مختلف لهذه المشكلة؛ هناك فعل لتوازن رهيف نوعًا بين كل الحدود المتضمنة، ويتطلب براعة أكثر مما قد تطرحه الأمثلة التبسيطية المستخدمة هنا، وينجح فقط عند هذا الشق من ٣٠ إلى ٧٠.

تمكن الراصدون من النظر إلى الوراء في الزمان إلى مدى أبعد حيث الإزاحات الحمراء أعلى وأعلى، وكان أن ظلوا هكذا يعثرون على مجرات أولية وسحب من غاز هيدروجين ساخن في كل مرحلة ماضية في الزمان. أفضل تفسير لذلك هو، كما سوف نرى، أن هناك ثقوبًا سوداء تتشكل مبكرًا جدًّا في حياة الكون وتعمل كبذور تنمو عليها المجرات. تطرح بعض العمليات الحسابية أن بذور الثقوب السوداء الأولية تتكون نتيجة تراوحات في كثافة الكون تحدث حوالي وقت التركيب النووي الأولي. لا يزال هذا مجرد فرض — وهو مثل لما «نظن» أننا نعرفه — إلا أنه أفضل تفسير توصل إليه أي فرد حتى الآن.

أجري تحليل لأرصاد المجال الفائق العمق لهابل في ٢٠٠٤ تبين منه أنه عند إزاحة حمراء بمقدار ٦، وقت ما يقرب من ٩٠٠ مليون سنة بعد الانفجار الكبير، كان الكون يحوي أجرامًا كثيرة صغيرة باهتة تسمى المجرات القزمة. الضوء فوق البنفسجي الصادر عن هذه الأجرام هو الذي يكمل عملية إعادة التأين. على أنه عند الإزاحات الحمراء الأكبر قليلًا، وقت ما يقرب من ٧٠٠ مليون سنة بعد الانفجار الكبير، قلّ على نحو ملحوظ ما يوجد من هذه المجرات القزمة، الأمر الذي يطرح أن ما نراه هو فترة يصل فيها تكوين هذه المجرات الصغيرة إلى ذروته.

لا شك أن هذه المجرات القزمة لم تستغرق زمنًا طويلًا لتندمج إحداها مع الأخرى وتشكل مجرات أكبر. في دراسة أخرى سُجلت في ٢٠٠٤، حلل علماء الفلك الضوء الآتي من مجرات كانت موجودة وعمر الكون يتراوح بين ثلاثة وستة مليارات عام (أي منذ ما بين ثمانية وأحد عشر مليار سنة). وهي مجرات مرئية بالتلسكوبات الأرضية. الملمح اللافت للنظر في المجرات التي درست في هذا البحث المسحي هو أنها منظومات وصلت «للنضج» تبدو مشابهة جدًّا للمجرات التي نراها في الكون القريب حاليًا. فهي مجرات قد انتهت فعلًا من المرحلة المبكرة الرئيسية من الاندماج وتكوين النجوم وتم استقرارها في حالة هادئة نسبيًّا. بل هناك مجموعة عنقودية من المجرات، وهي بكل تأكيد منظومة تم نضجها بهذا المعنى، وتم الكشف عنها عند مسافة تسعة مليارات سنة ضوئية، أي بعد الانفجار

الكبير بخمسة مليارات سنة. وفي مثل مذهل لقدرة التكنولوجيا الحديثة، تم تعيين هذا الحشد العنقودي لأول مرة في صورة بأشعة إكس التقطها القمر الصناعي الأوروبي إكس إم إم-نيوتن،[١٠] وقد تكشف بواسطة ٢٨٠ فوتونًا فحسب جمّعها التلسكوب بالتعرض للضوء مدة ١٢,٥ ساعة من رقعة من السماء بالغة الصغر. عندما وُجهت التلسكوبات الأرضية البصرية لتلك الرقعة، وجدت هناك اثنتي عشرة مجرة كبيرة في قلب ما يحتمل أن يكون حشدًا عنقوديًا من مئات من المجرات الأصغر (هي أبهت من أن يمكن رؤيتها من الأرض) وهي تتماسك معًا بفعل الجاذبية. أُعلن هذا الاكتشاف في ربيع ٢٠٠٥، وربما يكون هذا التكنيك قد تمكن من أن يكشف أثناء قراءتك لهذه الكلمات عن مزيد من الحشود العنقودية على مسافات مثل ذلك.

هناك الكثير من المجرات القرصية مثل مجرتنا درب التبانة (وهي أحيانًا تسمى أيضًا بأنها مجرات لولبية، وإن كان هذا ليس حقًّا بالاسم الجيد لأنه لا يحدث أبدًا أن تُظهر المجرات القرصية كلها نمطًا لولبيًا)، وإذا كان الكون يحوي حاليًا الكثير من المجرات القرصية فهو يحوي أيضًا الكثير من المجرات الإهليلجية (وهي مجرات تتراوح في شكلها من الشكل الكروي إلى الشكل «البيضاوي» مثل كرة القدم الأمريكية، وتأتي في أحجام كثيرة مختلفة) كما يحوي الكون بعضًا مما تبقى من المجرات القزمة الصغيرة غير المنتظمة في الشكل. تبين الأرصاد أن كل ذلك المدى من هذه الأنواع قد ترسخ بالفعل في الكون بحلول الوقت الذي وصل فيه عمر الكون إلى ثلث عمره الحالي، وكانت هذه المجرات تتجمع بالفعل وقت ذاك في مجموعات عنقودية محددة تحديدًا جيدًا. في هذا كله دليل على أن تركيزات بالغة الكبر من المادة المظلمة كانت موجودة لتؤدي دور البذور لتكوين المجرات بالبدء مباشرة من وقت إعادة الاتحاد — إلا أننا ليس لدينا إلا قدر صغير على نحو محبط من الأدلة الرصدية المباشرة الناتجة عن إزاحات حمراء بأكثر من ٧.

---

[١٠] إكس إم إم نيوتن X M M-Newton: اختصار X ray multi-mirror mission، قمر صناعي أوروبي يحمل ٣ تلسكوبات ترصد أشعة إكس التي تصدر عن الأجرام. (المترجم)

هناك تخطيط لتلسكوب يخلف هابل تلسكوب الفضاء، وهو تلسكوب الفضاء جيمس ويب، (تفجو).[١١] و«تفجو» ينبغي أن يتمكن من النظر إلى الوراء إلى ما هو أبعد، عند إزاحات حمراء بمقدار ٢٠، ولكن إلى أن يتم إطلاق «تفجو»، الذي لن يكون قبل ٢٠١١، سيكون على علماء الفلك أن يعتمدوا على صدف اصطفاف المجرات على طول خط الإبصار حيث توجد أجرام عند إزاحات حمراء مقدارها بالغ الكبر، حتى ينالوا لمحة مما كان يجري في ذلك الوقت القريب من الانفجار الكبير.[١٢]

عندما يحدث هذا، فإن جاذبية المجرة الاعتراضية (أو كل الحشد العنقودي للمجرات) يمكن أن تحني الضوء الآتي من الجرم الأكثر بعدًا وتركزه وكأنها مثل عدسة مكبرة ضخمة. هذه العدسة الجذبوية تعمل وكأنها نوع من تلسكوب طبيعي أقوى كثيرًا من أي تلسكوب صناعي، ما يلزم لذلك من اصطفاف في خط واحد أمر نادر وعادة ينتج عنه صورة مشوهة نوعًا للجرم البعيد، على أن وجود صور قليلة مشوهة أفضل من عدم وجود صور على الإطلاق.

تم العثور على أبعد ما عرف من المجرات المفردة بهذه الطريقة (وقت كتابة هذا في صيف ٢٠٠٥). التقطت صورة بتعرض طويل للضوء لمجموعة عنقودية قريبة من المجرات تسمى آبل ٢٢١٨ وذلك بواسطة «هتف»، وتكشف اللقطة عن صورة مشوهة لمجرة أكثر بعدًا تتراكب على صورة المجموعة العنقودية. تحليل الضوء الآتي من هذا الجرم يتضمن أن له إزاحة حمراء تقرب من ٧، تقابل النظر إلى الوراء إلى ١٣ مليار سنة، وأننا نرى المشهد بضوء غادر الجرم عندما كان عمر الكون يبلغ فقط ٥ أو ٦ بالمائة من عمره الحالي. من الصعب تقدير حجم هذه المجرة الأولية بسبب طريقة

---

[١١] إنها لعلامة عل مرور الزمن أنه في حين أن هابل تلسكوب الفضاء (هتف) قد سمي على اسم أحد رواد علم الفلك، فإن تلسكوب (تفجو) قد سمي باسم أحد إداريّ ناسا!

[١٢] بسبب الطريقة التي تعمل بها المعادلات، نجد بالنسبة للأجرام القريبة (التي لها إزاحات حمراء أقل من الواحد) أنه على الرغم من أن مضاعفة الإزاحة الحمراء تتضمن مضاعفة مسافة البعد، فإن الإزاحة الحمراء مع الاقتراب من الانفجار الكبير تشذ عن القياس، بحيث نجد أن الانفجار الكبير نفسه يكون عند إزاحة حمراء لانهائية. ومن ثم فإننا نجد مثلًا أن إزاحة حمراء من ٧ تناظر مسافة من ١٢ مليار سنة ضوئية، ولكن الإزاحة الحمراء من ٢٠ تناظر «فقط» ما يقرب من ١٣,٥ مليار سنة ضوئية، وليس ٣٩ مليار سنة ضوئية. أشعة الخلفية الكونية تنبع من إزاحة حمراء تقرب من الألف.

تشوه الصورة، إلا أنها فيما يبدو عرضها ما يقرب فقط من ٢٠٠٠ سنة ضوئية، وإن كانت تسطع لامعة نسبيًّا في الجزء فوق البنفسجي من الطيف. في هذا إشارة إلى أن النجوم تتكوّن (أو كانت تتكون!) بنشاط في المجرة صغيرة السن، وذلك لأن النجوم صغيرة السن تكون عادة ساخنة ويصدر عنها الكثير من الضوء الأزرق وفوق البنفسجي. يتلاءم هذا تلاؤمًا رائعًا مع تقديرات وقت إعادة التأين، ذلك أن التأين فيما يعتقد قد تسبب عن إشعاع فوق بنفسجي من المجرات صغيرة السن. وهذا بدوره يطرح أن هذا الجرم غير المثير ربما يكون حقًّا إحدى المجرات الأولى التي تكونت في وقت مبكر جدًّا. هناك دراسة أخرى استغلت أيضًا ظاهرة العدسة الجذبوية الطبيعية، وفيها حدد علماء الفلك وجود جرم أصغر حتى من ذلك، مجموعة عنقودية من النجوم وليس من المجرات، وهي تقع أيضًا على مسافة تزيد قليلًا عن ١٣ مليار سنة ضوئية. هذه التجمعات العنقودية هي تجمع كروي من نجوم تتماسك معًا بالجاذبية ويحوي التجمع ما يقرب من مليون نجم مفرد، وهي أكثر المكونات شيوعًا للمجرات مثل مجرة درب التبانة. هذا كله دليل قوي على أن المجرات الكبيرة التي نراها في الكون الحالي قد تكونت من تجمع واندماج وحدات أصغر تكونت أولًا — أي بناء بنية الكون بطريقة من «أسفل إلى أعلى»، التي لا تزال مستمرة إلى الآن.

ما زال هناك عنصر مكوّن واحد يضاف إلى الخلطة — وهو الأجرام ذات الطاقة النشطة التي تسمى بالكوازارات، ويعتقد أن مصدر طاقتها ثقوب سوداء ذات كتلة فائقة، وتحوي كتلة تماثل الملايين من نجوم كالشمس، وإن كان الكثير من هذه الكتلة قد يكون أصلًا من المادة المظلمة. اسم «الكوازار» مشتق من كلمتي «quasi-stellar أشباه النجوم»، وهذا اسم عكسي، لأنه عند التقاط صور السماء بزمن تعرض قصير تبدو الكوازارات كالنجوم، ولكنها ليست نجومًا، فالصور بزمن تعرض أطول تكشف عن أن الكوازارات أجرام لامعة لمعانًا هائلًا في قلوب بعض المجرات، وهي تسطع بلمعان بالغ يصعب معه رؤية النجوم المحيطة من المجرة نفسها، تمامًا مثلما تصعب رؤية البريق الصادر عن شموع قليلة في وهج أضواء كشافة بجوارها. من المعتقد أن الطاقة التي تجعل الكوازارات تسطع بلمعان بالغ

هكذا تنطلق منها عندما تبتلع المادة من المنطقة الداخلية للمجرة المحيطة بها، كما يعتقد أيضًا أن كل المجرات الكبيرة (بما في ذلك مجرتنا درب التبانة) فيها ثقب أسود عند مركزها، وإن كان هذا الثقب في حالات كثيرة لم يعد بعد نشطًا لأنه قد ابتلع كل المادة المجاورة.

هذه صورة بعيدة جدًّا عن الصورة الشائعة عن الثقب الأسود كنجم قد تقلص إلى كتلة لا تزيد عن عدة أمثال قليلة لكتلة الشمس، وهذا أمر يستحق أن نذكر معه المزيد من بعض التفاصيل عن طبيعة هذه الوحوش. الثقب الأسود تجمع من المادة له شد جذبوي قوي قوة بالغة حتى إن لا شيء يمكن أن يفلت منه، ولا حتى الضوء. من الحقيقي أن إحدى طرائق إنتاج الثقب الأسود هي أن تؤخذ كتلة من مادة خام (أي مادة خام) مقدارها كتلات قليلة للشمس، وتُسحق في حيز عرضه كيلومترات قليلِة. يحدث هذا لبعض النجوم عند نهاية حياتها، وقد تم الآن تعيين الكثير من مثل هذه الثقوب السوداء في مجرتنا — وهي بمنطق معقول تسمى بأنها ثقوب سوداء «لكتلة نجمية». إلا أن نتيجة هذه التجربة نفسها يمكن التوصل إليها بأن يُصنع جرم كبير جدًّا تكون كثافته العامة منخفضة نوعًا. هناك ملايين قليلة من نجوم مثل الشمس قد ضُرّت معًا في كرة لها نصف القطر نفسه مثل منظومتنا الشمسية حتى مدار نبتون (وكأنها تشبه نوعًا كيسًا كبيرًا من البلي الزجاجي)، وكثافتها تكون فحسب مثل كثافة محيطات الأرض، إلا أنها تُعد ثقبًا أسود، لا يوجد شيء يمكن أن يفلت منه. هذا النوع من الثقب الأسود الفائق الكتلة، وإن كان كبيرًا مثل المنظومة الشمسية، هو الذي يقطن في قلوب المجرات ويمد الكوازارات بالطاقة.

يمتلك هذا الثقب الأسود الفائق الكتلة شدًّا جذبويًا قويًا ويجذب المادة إليه. على أن مقدار المادة الكبير الذي يُجذب بهذه الطريقة يصعب عليه إلى حد بعيد أن يدخل في الثقب الأسود، لأن له مساحة سطح بالغة الصغر، ومن ثم فإن المادة التي تهوى إليه تتكدس في قرص يدور في دوامة حول الثقب الأسود، ويتخذ بالتدريج طريقه في شكل قمع للداخل من الثقب. تتحرك المادة في القرص حركة سريعة لأنها تكون تحت تأثير قوة شد جذبوية بالغة القوة، وهي تدور في دوامة، فتصير ساخنة إذ تصطدم الذرات إحداها

بالأخرى. يحّول هذا طاقة الجذب إلى حرارة، وضوء، وأشعة راديو، وأشعة إكس وكل هذا يجعل الكوازار يسطع في لمعان طالما يكون لديه مصدر للمادة ليغذيه. تجرى هذه العملية بكفاءة بالغة حتى إن ما يصل إلى نصف طاقة كتلة السكون للمادة التي تهوي إلى داخل الثقب تتحول إلى طاقة مشعة، وذلك بما يتفق مع معادلة أينشتاين المشهورة، ويكون على الثقب الأسود أن يبتلع فحسب مادة يبلغ مقدارها ما يقرب من كتلة شمسية واحدة في كل سنة ليبقى الكوازار ساطعًا. إلا أن الإمداد بالوقود ينفد في النهاية، وليس غير كوازارات قليلة لا تزال نشطة حاليًا في الكون المجاور لنا.

لا بد أن هذه الثقوب السوداء كانت بذورًا مهمة لتنامي البنية مبكرًا في تاريخ الكون، وحقيقة أن البنية قد تنامت سريعًا كما فعلت، تطرح أن الثقوب السوداء كانت موجودة منذ أول لحظات مبكرة جدًا بعد زمن إعادة الاتحاد، وربما تكون قد نتجت عن عمليات لم تفهم بعد فهمًا كاملًا وتدخل فيها المادة المظلمة، قبل أن تبرد الخامة الباريونية إلى الحد الكافي لأن تتقلص إلى نجوم ومجرات. أرصاد الكوازارات التي نراها عند إزاحة حمراء ترجع كل الطريق وراء إلى ما يصل مقداره إلى ٦٫٥، تبين أنه كان هناك ثقوب سوداء كبيرة مثل أي من الثقوب الموجودة حاليًا في الكون (وربما تحوي كتلة مقدارها مليار مثل لكتلة الشمس) وهي ثقوب وُجدت بالفعل خلال مليار سنة من الانفجار الكبير، عندما كان عمر الكون أقل من عُشر عمره الحالي. على أن هذا هو عند أقصى ما يمكن أن نصل به وراء بأرصادنا للمجرات والكوازارات. حان الوقت الآن لأن نصل في رحلتنا إلى أفضل تفسير، وإن كان، كما يُقر به، لا يزال يتصف بالتخمين، وهو تفسير يشرح لنا الطريقة التي انبثقت بها بنية الكون بعد الانفجار الكبير.

بعد الانفجار الكبير بمقدار إزاحة حمراء تقرب من ١٠٠، أي بعده بحوالي ٢٠ مليون سنة، كان الكون لا يزال أملس تقريبًا، إلا أن تكوين البنية بدأ يتنامى سريعًا وقت ذاك. أرجح ما يرشّح هنا كمادة مظلمة باردة (ستناقش بتفصيل أكثر في الفصل التالي) هو جسيمات يكون لكل منها كتلة مقدارها يقرب من مائة مثل كتلة البروتون الواحد. النمط المرصود للبنية

الموجودة في الكون يبين أن الجسيمات المفردة من المادة المظلمة الباردة لا بد أن يكون مقدار كتلتها أقل من خمسمائة مثل كتلة البروتون — أي أقل من ٥٠٠ جيجا إلكترون فولت — في حين أن تجارب المعجلات تستبعد أي كتلة أقل من حوالي ٤٠ جيجا إلكترون فولت. لا تتفاعل هذه الجسيمات مع الباريونات إلا من خلال الجاذبية أو إذا اتفق أنها ارتطمت بأحد الباريونات ارتطامًا عنيفًا. عند إزاحة حمراء مقدارها ١٠٠، تكون الباريونات ما زالت أسخن جدًّا من أن تتقلص لتشكل أجرامًا مدموجة، إلا أن محاكيات الكمبيوتر تبين أن المادة المظلمة الباردة سوف تتقلص سريعًا بالشد الجذبوي، بداية من التموجات الصغيرة من النوع الذي يُرَى في إشعاع الخلفية، إلى أن تصل عند إزاحة حمراء مقدارها بين ٢٥ و٥٠ حيث تكون قد شكلت سحبًا كروية من المادة المظلمة لها كتلة مثل كتلة الأرض ولكن حجمها كبير مثل حجم منظومتنا الشمسية، ومع تركز معظم الكتلة في كل سحابة عند مركزها. ثم تتجمع السحب نفسها معًا كنتيجة لشدها الجذبوي المتبادل، وهي تقاوم تمدد الكون لتشكل تجمعات عنقودية من السحب، ثم تجمعات عنقودية من هذه التجمعات، حيث نجد مرة أخرى أن معظم الكتلة يتركز عند المركز.

عند حلول الوقت الذي تبرد فيه الباريونات بالدرجة الكافية لأن تتقلص، تكون الثقوب الوعائية قد تنامت جيدًا — مع وجود ثقوب سوداء في المركز من التجمعات الكبرى من هذه السحب — بحيث إن المادة الباريونية تنساب داخلة تجاه تركيزات المادة المظلمة، لتشكل النجوم والمجرات وهي تفعل ذلك. يفسر هذا السيناريو ببراعة وجود أجرام لامعة بكتل تتراوح بين مقدار يصل إلى كتلة ملايين قليلة مثل كتلة شمسنا (مثل ما في التجمعات العنقودية الكروية للنجوم) ومقدار يصل إلى مئات المليارات من مثل كتلة شمسنا (كما في المجرات مثل درب التبانة) وبين أكبر حتى من ذلك بعشرات الآلاف من المرات (مثل ما في التجمعات العنقودية الفائقة للمجرات). تطرح الحسابات أيضًا أن هناك أعدادًا هائلة من السحب الأصلية للمادة المظلمة التي لها كتلة تماثل كتلة الأرض لا بد أنها تظل باقية حتى وقتنا الحالي، يصل عددها في الهالة الكروية من المادة المظلمة المحيطة بمجرتنا إلى مليون مليار (10^{15}). ينبغي أن ينتج عن التفاعلات بين جسيمات المادة المظلمة

داخل هذه السحب وابل من أشعة جاما هو أضعف من أن يتم اكتشافه فوق الأرض، وربما سيمكن اكتشافه بواسطة الجيل التالي من تجارب الأقمار الصناعية، قبل حوالي ٢٠١٢.

تبين الحسابات أنه حتى عند إزاحة حمراء بمقدار ٦,٥، بما لا يكاد يزيد عن مليار سنة بعد الانفجار الكبير، سيكون الوقت عندها بعد إعادة الاتحاد كافيًا لأن ينتج عن هذه العملية من التنامي من أسفل إلى أعلى ثقوب سوداء تكون لها كتلة من مليار مثل كتلة الشمس أو أكثر، وتكون هذه الثقوب مغمورة في هالات من المادة المظلمة تحوي مادة يقرب مقدارها من ألف مليار كتلة شمس، مع تهاوي المادة الباريونية إلى الثقب الأسود لتوفر ما يلزم للكوازار من الطاقة، بينما تتشكل النجوم من سحب الباريونات التي تقع إلى الخارج بعيدًا عن مركز الجرم. على أن هذا التنامي لن يكون بالسرعة الكافية لأن يكوّن بنى في حجم درب التبانة في الوقت المتاح له، إلا إذا كان للثقب الأسود المركزي كتلة لا تقل عن مليون كتلة شمسية، ولحسن حظ العلماء المنظرين، فإن كتلة الثقب الأسود في قلب مجرة التبانة نفسها قد ثبت في النهاية أنها بمقدار يقرب من ثلاثة ملايين مثل كتلة شمسنا.

ما يُرى في الكون حاليًّا من أنواع المجرات نتج إلى حد بعيد عن عمليات الاندماج. يمكننا أن نرى اصطدامات وتفاعلات بين المجرات في مجموعات عنقودية كثيرة، وبدون دخول في التفاصيل من السهل أن ندرك على نحو عام كيف أن سحابة كبيرة متقلصة من المادة سوف تستقر طبيعيًّا، وهي تدور، إلى شكل قرص مثل مجرتنا. المجرات الأكبر حجمًا سوف تلتهم المجرات الأصغر إذا اقتربت منها اقترابًا بالغًا، على أن الاصطدام بين المجرات القرصية، الذي ربما يتضمن اندماج الثقوب السوداء في مراكزها، يمكن أن ينتج عنه تفجرات من تكوين للنجوم مع انتزاع المادة من الأقراص، لتشكل أجرامًا إهليلجية، وعندما يتكون جرم إهليلجي بهذه الطريقة ويستقر بعد حدث كهذا، فإنه قد «ينمو» إلى قرص جديد إذ يستقر المزيد من المادة الباريونية حول ما يشكل الآن النتوء المركزي. هناك مجرات صغيرة شكلها غير منتظم هي ببساطة مخلفات تخلفت من أيام الكون المبكرة — وتبين الأرصاد، كما قد يتوقع القارئ، أنه كان هناك عدد أكبر كثيرًا من المجرات

الصغيرة عندما كان عمر الكون صغيرًا بالمقارنة بعمره الآن. ابتُلعت هذه المجرات الصغيرة في عمليات اندماج لتصنع المجرات الكبيرة التي نراها الآن.

أكبر المجرات في الكون كلها إهليلجيات، وبعضها هو حقًّا كبير جدًّا. ما يقرب من ٦٠ في المائة من المجرات هي مجرات إهليلجية، على أن أكبرها تحوي كتلة يصل مقدارها إلى ترليون (١٠^١٢) مثل كتلة الشمس، ومن ثم فإن هناك حتى نسبة أكبر من الكتلة الباريونية في الإهليلجيات. الحقيقة أن ثلاثة أرباع كتلة النجوم في الكون كله تكون في شكل هذه الإهليلجيات الماردة، التي نراها وراء عند إزاحة حمراء بمقدار ١,٥ أو أكثر، وهي وراء ذلك تكون أبهت من أن يتم الكشف عنها بطريقة مباشرة. على أن من الواضح من لون نجومها أنها كانت بالفعل كبيرة السن وقتها، وأن بعضها تكوّن عند إزاحات حمراء بمقدار ٤ أو ٥، أو على الأقل فإن المكونات التي اندمجت لتصنعها تكوّنت عند إزاحات حمراء بمقدار ٤ أو ٥.

يبدو أن عمر مجرتنا أكثر قليلًا من عشرة مليارات سنة، إلا أن شمسنا هي والمنظومة الشمسية عمرهما أقل من نصف ذلك، أي ما يقرب من ٤,٥ مليار سنة. من الواضح أن تشكيل النجوم ظل مستمرًا زمنًا طويلًا بعد تشكيل أول المجرات، ونحن في الحقيقة نستطيع أن نرى حاليًّا نجومًا وهي لا تزال تتشكل في مجرتنا. هذا أمر مفيد، لأنه يساعدنا على أن نفهم من أين أتت النجوم، وهو يساعدنا بوجه خاص على أن نفهم الطريقة التي بدأت بها المنظومة الشمسية التي نعيش فيها. على أنه قبل أن نترك الكون بصورة عامة ونركز على ذاك الموضوع الذي يثير اهتمام أفراد البشر اهتمامًا خاصًّا، لا يزال هناك أمر علينا حله. كما ذكرنا، فإن توليفات الأرصاد، ومحاكيات الكمبيوتر، والنظريات تخبرنا بأن الكمية الكلية للمادة في الكون مقدارها ٣٠ في المائة من الكمية اللازمة لجعل الكون مسطحًا. إلا أن هذه التوليفات نفسها تخبرنا بأن الكون هو «فعلًا» مسطح! لو كان مفتوحًا فإنه سيتطاير لتتباعد أجزاؤه بأسرع مما يمكن أن تتشكل به في الوقت المتاح مجرات مثل درب التبانة، وما كنا عندها سنوجد هنا لنتساءل عن الطريقة التي بدأت بها الأمور. وإذن، ماذا حدث لنسبة السبعين في المائة الأخرى؟ ما الذي يبقي الكون متماسكًا معًا؟

الفصل السادس

ما الذي يحفظ تماسك الكون؟

عندما أدرك علماء الكونيات لأول مرة أن الكون فيه أكثر مما تراه العين، وأكثر حتى مما يمكن تفسيره بالاعتماد على المادة الباريونية المظلمة، كان طبيعيًّا أن يكون أول ما افترضوه هو أنه لا بد أن هناك مواد غير باريونية تطفو هنا وهناك في شكل جسيمات غريبة (بالمقارنة بالمواد الأرضية) أو تكتلات غريبة في المسافات بين النجوم والمجرات المرئية. أيد هذا الافتراض ما تلا ذلك من أرصاد للكون تشير بقوة إلى أن هناك فعلًا وجودًا لمادة مظلمة غريبة من هذا النوع. ولكن هذه الأرصاد نفسها تخبرنا بأنه حتى مع إضافة أقصى مقدار ممكن من هذه الجسيمات الغريبة إلى كل الباريونات في الكون فإن هذا لا يوفر قدرًا من المادة يكفي لجعل الكون مسطحًا. يتضمن هذا أنه لا يزال هناك بالإضافة إلى ذلك مكون ثالث للكون أصبح يعرف باسم الطاقة المظلمة. كما سبق أن رأينا، فإن كل مادة الكون، مع تجميع الباريونات والجسيمات الغريبة معًا، يصل مجموعها إلى نسبة ٣٠ في المائة فقط من الكثافة اللازمة للتسطح. ومع ذلك فإن المادة المظلمة الغريبة لا تزال تسهم إسهامًا له قدره في الحفاظ على تماسك الكون، (فإسهامها تصل أهميته إلى ستة أو سبعة أمثال إسهام المادة الباريونية)، ومن ثم فإننا سنلقي أولًا نظرة عليها قبل أن نصل إلى تفهم الطاقة المظلمة.

بصرف النظر عن الجزء الضئيل من الكتلة الكلية الذي توفره النيوترينوات، فإن هذه المادة المظلمة الغريبة لا بد أن تكون كلها باردة، بمعنى أن هذه الجسيمات تتحرك بسرعة أبطأ كثيرًا من سرعة الضوء. وهي

عادة يُشار إليها بأنها المادة المظلمة الباردة (ممب)،[1] وإن كان بعض علماء الفلك من المغرمين بالاختصارات يستخدمون مصطلح «الويمبات WIMPs» المشتق من الكلمات الانجليزية Weakly Interacting Massive Particles أي الجسيمات ذات الكتلة الضعيفة التفاعل.[2] كلا المصطلحين يشيران إلى الشيء نفسه، وعلى الرغم من أنه لو كانت كل مادة «ممب» مصنوعة من النوع نفسه من الخامة لكان في هذا تبسيط مريح، إلا أنه لا يوجد في الأرصاد أي شيء يخبرنا بذلك. في حدود ما نعرفه يمكن أن توجد أنواع مختلفة من الويمبات، ما دامت كتلتها الكلية تصل إلى ما يقرب من ٢٦ في المائة من الكمية اللازمة للتسطح. على أن الحقيقة هي أن علماء فيزياء الجسيمات تمكنوا من طرح مرشحين اثنين جيدين لجسيمات «ممب». قد يكون ذلك ناتجًا عن قصور في قدرتهم على التخيل، ولكنه يساعد في تجنب تعقيد الصورة أكثر من اللازم. من الممكن أن تكون مادة «ممب» مصنوعة كلها من أحد هذين النوعين من الجسيمات، أو مزيج من أي قدر من الاثنين، بشرط أن يصل إجمالي الكتلة إلى النسبة الحرجة التي تبلغ ٢٦ في المائة. نحن الآن، كما يرى القارئ، قد دخلنا بالفعل في منطقة ما «نظن» أننا نعرفه، بدلًا من منطقة ما نعتقد أننا «نعرفه»، وستغدو الأمور أسوأ عندما ننتقل إلى تناول الطاقة المظلمة.

أول جسيم مرشح لمادة «ممب» يسمى الأكسيون. وهذا اسم ملائم، لأن وجود الأكسيون (إن كان له وجود بالفعل) له علاقة بخاصية للجسيمات تسمى اللف أو البرم، يمكن أن نفكر فيها على أنها أشبه بكرات صغيرة تدور حول محاورها، مع أنه — كما في كل القياس بالتماثل في عالم الكمومية — لا تمثل هذه الصورة إلا جزءًا من الحقيقة. يتفق أيضًا أن «أكسيون» هو اسم لمنظف ملابس يستخدم في الولايات المتحدة، وأخذ الفيزيائيون المساهمون في البحث اسمه ليطلقوه على الجسيمات، فليس علماء الفلك وحدهم الذين تنتابهم أحيانًا سعادة طفولية عند اختيار أسماء للكيانات التي تكتشف حديثًا.

---

[1] اختصار المادة المظلمة الباردة بالإنجليزية هو Cold Dark Matter = CDM. (المترجم)

[2] «ذات الكتلة» هنا تعني فقط أن لديها «بعض» كتلة، وليس أنها بالذات ثقيلة.

ظهرت الحاجة إلى جسيم الأكسيون أول مرة في نهاية سبعينيات القرن العشرين، عندما كان منظرو فيزياء الجسيمات يكافحون لتفهم أحد الآثار العجيبة في الديناميكا اللونية الكمومية؛ أثر يوحي بأنه قد تكون هناك بعض عمليات من اضمحلال الجسيمات تنتهك مبدأ سمترية الزمان، أو بكلمات أخرى فإن التفاعلات المساهمة في ذلك «تعمل» فقط في اتجاه واحد للزمان. كان في هذا ما ينذر بالخطر لأن أحد أعز المعتقدات عند الفيزيائيين النظريين هو أن هذه التفاعلات كلها تعمل جيدًا على نحو متساو «إلى الأمام» أو «إلى الخلف» في الزمان، مثل فيلم فيديو لاصطدام كرتي بلياردو، وهو يظهر معقولًا تمامًا عندما نشغّل شريط الفيديو في أي من الاتجاهين. حتى يسترد المنظرون سمترية الزمان[٣] في التفاعل، كان عليهم تأسيس مجال جديد، هذا المجال — مثل كل المجالات في عالم الكم — يلزم أن يكون له جسيم مصاحب، هو في هذه الحالة جسيم الأكسيون.

أشارت النسخ المبكرة من هذا النموذج إلى أن الأكسيون لا بد أن تكون له كتلة كبيرة ومن ثم ربما يمكن الكشف عنه في تجارب المفاعلات خلال سنوات قليلة. إلا أنه في ثمانينيات القرن العشرين، في الوقت الذي بدأ فيه الفشل في اكتشاف الأكسيون يصبح أمرًا مربكًا، أُدخلت عندها الديناميكا اللونية الكمومية في النظريات الموحدة الكبرى، ووُجد في هذا السياق أن النموذج يتطلب أن يكون للأكسيون كتلة أصغر بكثير، بما يجعله أخف كثيرًا من أن يمكن الكشف عنه بطريقة مباشرة. أطلق على ذلك الأكسيون «غير المرئي»، ورفضه الكثيرون من الفيزيائيين على أنه نوع من الفكاهة. فما فائدة اختراع جسيم أخف من أن نتمكن من رؤيته لتفسير حالة لا تذكر من انتهاك السمترية، في حين أنه انتهاك قد يكون على أي حال حقيقيًّا؟ على أنه عندما بدأ علماء الفلك يدركون أن هناك حاجة إلى المادة المظلمة، كان الأكسيون مرشحًا جاهزًا لهذا الدور. ثبت أيضًا في النهاية أن الأكسيونات تنشأ بصورة طبيعية في سياق نظرية الأوتار.

هناك خاصية أساسية أخرى للأكسيون تتنبأ بها كل التنويعات على اللحن، وهي أنه على الرغم من كتلته الضئيلة، إلا أن الطريقة التي يتم

[٣] عليّ أن أعترف أني شخصيًا لن أحزن كثيرًا عندما تُنتهك سمترية الزمان على هذا النحو البارع.

بها إنتاجه طبيعيًّا في تفاعلات الجسيمات تطلقه ليتحرك بسرعات بطيئة، بالمقارنة بسرعة الضوء. إذا كانت هذه الأفكار صحيحة، فإنه يتم إنتاج أعداد هائلة من الأكسيونات في الانفجار الكبير، وذلك حوالي الوقت الذي تتكثف فيه الكواركات لصنع بروتونات ونيوترونات، ولكنها ستكون حقًّا جسيمات مادة مظلمة «باردة». وهكذا فإن الأكسيونات بدلًا من أن تنساب خلال الفضاء لتجعل البنية الأولية للكون المبكر ناعمة كما تفعل جسيمات النيوترينو الثقيلة، فإنها تتكتل معًا بتأثير جاذبيتها هي نفسها، لتصنع الثقوب الوعائية التي ستهوي إليها المادة الباريونية. هكذا فهي معًا «تستطيع» أن توفر كل المادة المظلمة الباردة.

أفضل طريقة لتناول كتل الأكسيونات «المنفردة» أتت في النهاية على يد علماء الفيزياء الفلكية وليس علماء فيزياء الجسيمات. بما أن الأكسيونات تتفاعل فحسب تفاعلًا ضعيفًا مع المادة الباريونية، مثلها في ذلك تمامًا مثل جسيمات النيوترينو، فإنها تتمكن من الانسياب خارج القلوب المركزية للنجوم إلى الفضاء بدون أن يعوقها شيء عمليًّا، وتحمل الطاقة معها بعيدًا فتبرد قلوب النجوم. يكون هذا الابتراد أكثر فعالية كلما زاد ثقل الأكسيونات (وهو عند جسيمات النيوترينو يكون بالغ الصغر إلى حد يمكن إهماله)، وإذا كان لكل أكسيون كتلة أكبر من ٠,٠١ إلكترون فولت فإن هذا سيؤثر بطرائق ملحوظة في مظهر النجوم وفي طريقة انفجار بعض النجوم الكبيرة في السن كسوبرنوفات. بما أن هذه التأثيرات لم ترصد في النجوم الحقيقية، فلا بد أن كتلة الأكسيون أقل من ٠,٠١ إلكترون فولت (ويحتمل أن يكون ذلك على الأقل بعامل من عشرة) أو أنها ٠,٠٠٢ جزء من المليون من كتلة الإلكترون. تطرح النماذج النظرية أن كتلة الأكسيون يمكن أن تكون حتى أقل من ذلك، أي أقل من ٠,٠٠٠١ إلكترون فولت. لا يكاد يدهشنا أن الأكسيونات هكذا لم يتم العثور عليها في تجارب المفاعلات هنا فوق الأرض!

كما قد يبدو من أسلوب تعليقاتي، فإنني لست من أنصار الأكسيون، وإن كان يجب الاعتراف بأنه «يمكن» أن يكون له وجود. أحد أسباب عدم حماسي للأكسيون، هو أنه حتى لو كان هناك وجود فعلي للأكسيونات غير المرئية، فسيكون من المستحيل تقريبًا الكشف عنها. الحقيقة أني لا أعرف

إلا اقتراحًا واحدًا جديًا للبحث عن الأكسيونات، وحتى هذا يبدو كأنه انتصار للأمل على التوقعات.

الأمل هو أن الأكسيونات ربما يتم الكشف عنها بوصفها نتيجة لتفاعلاتها النادرة جدًّا مع المجالات الكهرومغناطيسية. إلا أن هذا أمل غير ذي جدوى في نطاق أي مما يُتوقع أن يجرى في الواقع من كشف عن الأكسيونات في المستقبل القريب، الأمر الذي يظهر بوضوح عندما ندرك أن جسيمات النيوترينو وإن كانت تقاوم التفاعل مع المواد الأخرى، إلا أن تفاعلها أكثر ترجيحًا من تفاعل الأكسيونات بعشرة مليارات مثل. ومع ذلك تطرح النظرية أنه في أحيان نادرة جدًّا جدًّا سيتفاعل أحد الأكسيونات مع مجال كهرومغناطيسي لينتج فوتونًا، بموجة يعتمد طولها على كتلة الأكسيون. وبما أنه (لو كانت فكرة الأكسيون صحيحة) توجد هنا وهناك أعداد هائلة من الأكسيونات، فإن من الممكن أن يكون لدينا في أحد الأيام التكنولوجيا التي تكشف عن هذه الفوتونات. على أنه بالنسبة لكل عشرة مليارات أكسيون توجد فيما حولنا، يكون هناك احتمال لتفاعل واحد يمكن الكشف عنه وكأنك تحاول الكشف عن جسيم نيوترينو واحد.

هناك فقط احتمال بعيد للكشف عن هذا النوع من التفاعل في مستقبل ليس بعيدًا بعدًا بالغًا. بما أن كل الفوتونات سيكون لديها تقريبًا طول الموجة نفسه — بصرف النظر عن وجود انتشار تسببه حركة الأكسيونات المفردة خلال الفضاء — فإن هذه الفوتونات سوف تتضاعف مثل الفوتونات في حزمة شعاع ليزر (وإن كان ذلك أبهت كثيرًا جدًّا) لتنتج نبضة تشويش قابلة للكشف عنها (وهو في هذه الحالة تشويش أشعة راديو)، فيظهر نتوء في الطيف الكهرومغناطيسي يبرز حادًا في موقع حول أحد أطوال الموجات. سيعمل جهاز الكشف كالتالي: نحتاج أولًا إلى صندوق معدني (ما يسميه الفيزيائيون بأنه تجويف) يكون بالحجم الملائم بالضبط لفوتونات بطول الموجة المناسب لتشكيل موجات تقوم داخل الصندوق — هذا هو المبدأ نفسه مثل مبدأ ضبط أنابيب الأرغن لتنتج قيام موجات صوت لها نغمة معينة، ولكن المبدأ هنا يُطبق على موجات كهرومغناطيسية. ينبغي حماية التجويف من التدخلات من الخارج، فيبَّرد في حمام من الهيليوم السائل بدرجة حرارة

قريبة من الصفر المطلق (-٢٧٣° سلسيوس)، ويكون خاليًا تمامًا من المادة العادية، بحيث لا يحوي إلا جسيمات النيوترينو المحتومة (التي لحسن الحظ لا تنتج إشارة من نفس النوع الذي تنتجه الأكسيونات) وأي جسيمات من المادة المظلمة باردة توجد في الكون، بما في ذلك الأكسيونات إن كان لها وجود. يجب أن يُملأ الصندوق بعدها بأقوى مجال مغناطيسي يمكن إنتاجه، وكشافات حساسة لأشعة الراديو تُضبط للتوصل إلى سماع إشارة الأكسيون.

مع وجود تجويف في شكل مكعب أجوف طول كل جانب منه متر واحد، وقد امتلأ بأقوى مجال مغناطيسي يمكننا حشده في الصندوق، ستكون قوة مُخرج إشارة الأكسيون المتنبأ بها هي بالضبط جزء من مليون مليار مليار (١٠-٢٤) من الوات. جعل الفيزيائي لورانس كراوس من هذا أمرًا له منظوره بأن حسب أن كشافًا للأكسيون بحجم الشمس سوف ينتج نفس هذا المخرج من القوة في شكل مصباح كهربائي بقوة ٦٠ وات. ومن ثم، لا يكاد يدهشنا أن معظم الأفراد المتعقلين لا يتوقعون أن يروا برهانًا على وجود الأكسيونات ويفضلون أن يكون هناك مرشح آخر للمادة المظلمة يكون على الأقل مما يمكن الكشف عنه.

لحسن حظ من يفكرون منا بهذه الطريقة، أن هناك مرشحًا آخر أقوى كثيرًا للقيام بدور مادة «ممب»، وينبثق طبيعيًا (بل ينبثق في الحقيقة حتميًا) عن فكرة السمترية الفائقة، وسوف يكون الكشف عنه ممكنًا بكل تأكيد في المستقبل القريب إن كان له وجود بالفعل. كما رأينا في الفصل الثاني، فإن السمترية الفائقة (سوسي) تتضمن وجود أنواع من شركاء فائقي السمترية، هم نظراء لكل نوع وأي نوع من الجسيمات المعروفة، وإن كان أخف شريك فائق السمترية (أشف) هو فقط الذي يُتنبأ له بأنه مستقر. يطرح هذا في التو أن جسيم «أشف» مرشح جيد كجسيم المادة المظلمة الباردة اللازم لعلماء الكونيات.

أحد الجوانب الثانوية غير الملائمة هو أن فهمنا حاليًا للسمترية الفائقة لا ينبئنا بالفعل عما يكونه جسيم «أشف». ربما يكون هو الفوتينو (نظير «سوسي» للفوتون)، أو الجرافيتينو (نظير «سوسي» للجرافيتون)، أو أحد

الجسيمات الأخرى «لسوسي». حسب بعض صور النظرية،[٤] قد يكون هذا كمزيج من نوعين أو أكثر من الجسيمات المختلفة، بالطريقة نفسها التي تنتقل بها جسيمات النيوترينو خلال الفضاء كمزيج من أنواع النيوترينو الثلاث التي كُشف عنها في التجارب. على أن هناك أمرًا واحدًا نعرفه على وجه التأكيد هو أن جسيم «أشف» ليس له شحنة كهربائية، لأنه لو كان له بالفعل هذه الشحنة لكان من السهل الكشف عنه — بل الحقيقة أنه كان سيتم الكشف عنه في وقت يسبق كثيرًا إدراك علماء الفلك للحاجة إلى مادة «ممب». وإذن فحتى نترك كل الخيارات مفتوحة، فإنه غالبًا يشار إلى جسيم «أشف» ببساطة بأن اسمه نيوترالينو (أو بكلمات أخرى بأنه «جسيم سوسي الصغير المتعادل»). اسم نيوترالينو ليس اسمًا لأي جسيم معين. وإنما هو اسم شامل يغطي كل الخيارات لجسيم «أشف».

نظرية سوسى الأصلية تقول إن كتلة النيوترالينو يمكن أن يصل صغرها إلى عدد قليل من الجيجا فولتات (دعنا نتذكر أن كتلة جيجا فولت واحد هي تقريبًا كتلة بروتون واحد، أو ذرة هيدروجين). على الرغم مما تقوله نظرية سوسي هكذا، إلا أن هناك حقيقة مفادها أن هذه الجسيمات لم يتم بعد إنتاجها في تجارب المعجلات، وهذا يخبرنا بأن كتلتها لا بد أن تكون بالفعل أكبر من ٥٠ جيجا إلكترون فولت. يمكننا عند الطرف الآخر من المقياس إقامة أقصى حد أعلى لكتلة النيوترالينو، وذلك عن طريق علم الكونيات. كما رأينا في الفصل الخامس، فإن وجود جسيمات إضافية في الانفجار الكبير (مثل المزيد من أنواع النيوترينو) يجعل الكون يتمدد «بسرعة أكبر»، بأن يُدفع إلى الخارج بعنف أكثر. سيكون لجسيمات النيوترالينو التأثير نفسه، ولو كانت كتلة كل جسيم من النيوترالينو أكبر من حوالي ٣٠٠٠ جيجا إلكترون فولت لتمدد الكون بسرعة بالغة حتى إننا عندها لن نكون موجودين لدراسته. ليس هذا بالحد المقيد جدًّا، إلا أن بعض صور سوسي

[٤] أحس بشيء من عدم السعادة لاستخدامي الخاص لمصطلح «النظرية» هنا وفي مواضع أخرى في هذا الكتاب. لو كنت أكتب لقراء أكاديميين لكنت أكثر حرصًا في تمييز النظريات (التي لها جذورها على نحو سليم في التجربة والملاحظة) عن النماذج والفروض، التي تكون أكثر تخمينا. على أن كلمة «النظرية» لها أيضًا استخدام أوسع بين غير العلماء، وهذه هي الطريقة التي أستخدم بها الكلمة هنا.

(التي يحب المنظرون أن يفكروا فيها كصور محسَّنة) تطرح حدًّا أعلى يصل إلى حوالي عُشر ذلك، بما يقرب من ٣٠٠ جيجا إلكترون فولت، أو ثلاثمائة مثل لكتلة ذرة الهيدروجين. يبدو أن أفضل اقتراح مقبول حاليًا هو أن النيوترالينو له كتلة عند نقطة ما من المدى بين حوالي ١٠٠ جيجا إلكترون فولت إلى ٣٠٠ جيجا إلكترون فولت (بما يناظر تقريبًا كتل الذرات المفردة لأثقل العناصر الموجودة طبيعيًّا فوق الأرض، نواة اليورانيوم مثلًا لها كتلة قريبة من ٢٣٥ جيجا إلكترون فولت) لحسن الحظ أن هذا هو بالضبط المدى الذي يمكن سبره بالجيل التالي من تجارب المعجلات، والذي يمكن فيه الكشف المباشر عن جسيمات المادة المظلمة، بما يرتقي بهذه الحزمة من الأفكار من عالم التخمين إلى عالم العلم الحقيقي.

إذا كان هناك مادة «ممب» قدرها سبعة أمثال ما يوجد من مادة في شكل باريونات، وإذا قلنا مثلًا إن كل جسيم من «ممب» له كتلة مقدارها ١٤٠ جيجا إلكترون فولت، وبما أن متوسط كتلة الباريون الواحد يقرب من واحد جيجا إلكترون فولت، فسنجد إذن عندها نيوترالينو واحدًا لكل ٢٠ باريون في الكون. عندما تُنشر هذه بتساوٍ عبر الكون، فإن ذلك يتضمن وجود نيوترالينو واحد لكل ٤ أمتار مكعبة من الفضاء — ولكن هذه الجسيمات كما سبق أن رأينا، لا بد أن تكون بالفعل متكتلة معًا وليست مثل الخامة اللامعة في الكون، ومن ثم ينبغي أن يوجد عدد هو أكثر إلى حد ما من العدد الذي يمر من خلال الأرض ومن خلال معاملنا (بل حقًّا من خلال أجسادنا)، وقابل لأن يتم الكشف عنه.

بصرف النظر عن أن جسيمات النيوترالينو تُجعل بلا طاقة في اصطدامات الجسيمات في المعجل الكبير لاصطدام الهادرون (LHC)، وهذا بكل تأكيد احتمال موجود إذا كان لها كتل عند الحد الأدنى من المدى المتنبأ به، فإن هناك طريقتين للكشف عن جسيمات النيوترالينو في المعمل تتم الآن متابعة دراستهما. تعتمد كلا الطريقتين على حقيقة مفادها أن الوقت الوحيد تقريبًا الذي «تلاحظ» فيه المادة الباريونية وجود جسيمات النيوترالينو (عن طريق الجاذبية ليس إلا) هو عندما يصطدم أحد جسيمات النيوترالينو فيزيقيًّا مع نواة إحدى الذرات ثم يرتد بعيدًا. بالنسبة للذرات

(أو النوى) التي لها تقريبًا الكتلة نفسها مثل النيوترالينو، فإن هذه البعثرة كما تسمى، هي أشبه بالاصطدام بين كرتي بلياردو، حيث نجد أن النواة التي صُدمت تنكص متراجعة بينما النيوترالينو الوافد يرتد في اتجاه جديد. من المرجح إلى حد بعيد أن حدثًا كهذا يكون له تأثير ملحوظ إذا كانت النواة التي تُصدم بهذه الطريقة تدخل في تنظيم متين إلى حد بعيد، جزء من نظام لشبكة محكمة من ذرات كلها من النوع نفسه في نمط منتظم. حتى يُقلل إلى أدنى حد من الاهتزاز الطبيعي للذرات في شبكة كهذه، ينبغي تبريدها إلى كسر من درجة واحدة فوق درجة الصفر المطلق، -٢٧٣° سلسيوس؛ وحتى يُقلل إلى أدنى حد أي تداخل من التفاعلات الأخرى (مثلًا من الأشعة الكونية) ينبغي حماية هذه الذرات من العالم الخارجي بدرع. هذه ليست بالمطالب التي يسهل الإيفاء بها. على أنه بمجرد أن «يتم» الإيفاء بها، يصبح في الإمكان البدء في توقع الكشف عن جسيمات النيوترالينو.

إذا تم اصطدام كهذا — وهو أساسًا يماثل الاصطدام بين كرات البلياردو — ليحدث بين جسيم نيوترالينو وإحدى النوى في شبكة مبردة تبريدًا فائقًا ومحمية بدرع، كتلة من مادة مثل السيليكون أو الجرمانيوم، فسيكون هناك عندها، من حيث المبدأ، تأثيران قد يتم الكشف عنهما. أحدهما أن الذرة التي تنكص مرتدة يمكن أن تؤدي إلى هز جيرانها لتنتج موجة ضئيلة تنتشر خلال كتلة الدرع، موجة صوت ضعيفة جدًا. عندما تغطَّى كتلة المادة بغشاء من مادة فائقة التوصيل، فإن تأثير موجات الصوت في الموصل الفائق يمكن قياسه. شبكة الذرات يُحتفظ بها متماسكة بالقوى الكهرومغناطيسية، وكأن كل ذرة مرتبطة بجيرانها المباشرين بزنبركات بالغة الصغر، ويمكن للقارئ تصور ذلك وكأن كل الزنبركات الصغيرة تتواثب مرتدة إلى الداخل والخارج بطريقة منتظمة أثناء مرور موجة الصوت من خلال الشبكة. تم بالفعل اختبار هذا التكنيك بإعداد عينات سيليكون إعدادًا مناسبًا ليتم قذفها بإشعاع «عادي»، ونجح ذلك، إلا أنه حتى الآن لم يتمكن هذا التكنيك من الكشف عن جسيمات النيوترالينو.

الطريقة الأخرى للكشف عن اصطدامات النيوترالينو مع النوى العادية في كتل للمادة المبردة تبريدًا فائقًا هي ببساطة عن طريق ارتفاع درجة

الحرارة الذي ينتج في العينة عندما تؤدي طاقة حركة النيوترالينو أولًا إلى أن تجعل النواة «الهدف» ترتد ثم تجعل الذرات المجاورة تتصادم فيما حولها بطريقة غير منتظمة ولا مرتبة إذ تتشارك فيما بينها بالطاقة من خلال «الزنبركات» المتذبذبة. الطاقة المودعة بهذه الطريقة سيكون مقدارها فقط عدد قليل من الكيلو فولتات، ومن ثم فإن ارتفاع درجة الحرارة الناتج عن اصطدام جسيم نيوترالينو حتى ولو كان ذلك بكتلة صغيرة من السليكون، فسيكون ارتفاعًا قدره عدد قليل من الأجزاء من الألف من الدرجة — أما إذا كانت درجة حرارة العينة الهدف هي من قبل أجزاء قليلة من الألف فوق درجة الصفر المطلق، فإن هذا يمكن أن يعني تضاعفًا في درجة حرارتها! مرة أخرى فإن التكتيكات اللازمة لقياس تغيرات الحرارة من هذا النوع قد تم اختبارها، ونجح الاختبار. في هذه المرة، توجد بالفعل مزاعم بالكشف عن «إشارة» من المادة المظلمة، وإن كانت لسوء الحظ غير مؤكدة.

التجربة التي بدا لبعض الوقت أنها قد كشفت عن جسيمات مادة مظلمة تسمى تجربة المادة المظلمة DAMA، وهي تجربة اتخذت مقرها في منجم عند «جراند ساسو»، تحت جبال الإبناين في إيطاليا، حيث يتم هكذا حمايتها جيدًا بدرع يحميها من كل شيء في الخارج. بُني جهاز الكشف حول بلورة من أيوديد الصوديوم، وظل يعمل سنين عديدة، وبدا حسب ما أُطلق من بيانات عند بداية القرن الحادي والعشرين، أنه يظهر وجود تقلبات موسمية. أحد التفسيرات الممكنة لذلك هو أنه أثناء حركة الأرض حول الشمس، فإنها عند أحد جانبي الشمس تتحرك مصطدمة في مواجهة مباشرة بهالة جسيمات النيوترالينو التي تدور مع مجرتنا، وأنها عند الجانب الآخر من الشمس تتحرك مع حركة جسيمات النتيوترالينو. كما يحدث في اصطدام إحدى السيارات، فإن الاصطدام وجهًا لوجه سيودع في البلورة طاقة أكثر، بينما الاصطدام أثناء «تجاوز» سيارة أخرى سيودع طاقة أقل، ومن ثم فإن تأثيرًا موسميًا كهذا قد ينتج أيضًا عن وجود جسيمات النيوترالينو. بل إن أفراد فريق تجربة المادة المظلمة زعموا أنهم تمكنوا من التوصل إلى كتلة النيوترالينو، وأنها توجد عند نقطة ما بين ٤٥ و٧٥ جيجا إلكترون فولت. لسوء الحظ (أو ربما لحسن الحظ، لأن الكتلة

المقترحة تعد منخفضة نوعًا)، فإن هناك تجارب أخرى ينبغي أن تكون بالضبط بالحساسية نفسها مثل المادة المظلمة — بما في ذلك التجربة التي سميت «البحث عن المادة المظلمة الباردة التي تستخدم كشافات جرمانيوم وسليكون في مقرها أسفل منجم في مينيسوتا — ولم تجد هذه التجارب أي تأثير كهذا.

فيما أرى، فإن هذا النوع من جهاز الكشف هو الطريقة المرجحة للعثور على جسيمات المادة المظلمة الباردة، وأنه يمكن أن يوجد سريعًا جدًّا. تتخذ تجربتي المفضلة من هذا النوع مقرها أسفل منجم في بولبي بيوركشار، وبما أن لها فرصة جيدة لتعيين جسيمات النيوترالينو سريعًا، فإن هذه التجربة كما يبدو جديرة بوصفها ببعض المزيد من التفاصيل.

الجسيمات المرشحة كجسيمات مادة مظلمة (النيوترالينو) ضعيفة التفاعل، وإذا افترضنا أنها موجودة فسيكون هناك أقل من اصطدام واحد يوميًّا بين جسيم واحد من النيوترالينو وإحدى نوى الذرات في كتلة من المادة تزن ١٠ كيلوات. على الرغم من أن ما يوجد من الأشعة الكونية الباريونية هنا وهناك أقل كثيرًا من جسيمات النيوترالينو، إلا أن هذه الأشعة الباريونية تتفاعل بسهولة أكبر كثيرًا مع كتل المادة العادية، ولهذا فإنها ينتج عنها اصطدامات يومية أكثر كثيرًا، وهذا هو السبب في أن تجربة بولبي تقام في كهوف ملحية تحت الأرض بمسافة ١,١ كيلومتر على قاع أعمق منجم في أوروبا. الطبقة الصخرية فوق هذه الكهوف توقف كل الأشعة الكونية إلا جزءًا واحدًا من المليون، أما مليارات الويمبات أو ما يقرب، التي تمر في كل ثانية خلال إنسان يمشى على السطح فوق المنجم، فليس غير ثلاثة منها ستصطدم بالنوى في الصخر وهي في طريقها إلى الكهوف، وستؤدي هذه الاصطدامات إلى إبطاء الويمبات فقط، ولا تؤدي إلى إيقافها.

إلا أن هذه العملية من الترشيح ليست حتى كافية للإقلال من مستوى التشويش في الخلفية (بما يرادف التأثير الاستاتيكي على تشكيل سعة موجات الراديو، AM) وهذا التشويش ناتج عن تفاعل الأشعة الكونية على نفس مستوى ترددات أحداث المادة المظلمة في الكشافات، كما يجب أن يوضع في الحساب النشاط الإشعاعي الطبيعي للصخور المحيطة بالكهف.

على أنه يمكن امتصاص الكثير من هذا الإشعاع في مادة الدرع الحامي المحيطة بالكشافات — مواد مما يستخدم عادة مثل الرصاص، والنحاس، والشمع، والبوليثين — أو حتى بغمر جهاز الكشف داخل خزان يحوي ٢٠٠ طن من ماء نقي. هذه الكمية من المياه (المستخدمة كحاجز وقاية لا غير) تشغل حجمًا مقداره ٢٠٠٠٠٠ لتر، بما يقرب من عُشر حجم حمام سباحة بالمقاييس الأولمبية، ونصف حجم كشاف النيوترينو الذي ورد ذكره في الفصل الخامس.

حتى بعد اتخاذ كل هذه الاحتياطات سيظل هناك تشويش في خلفية المنظومة يتطلب مقاومة، ومن ثم فإن المرحلة الأخيرة يتم فيها استخدام أجهزة الكشف وتكنيكات إحصائية تستطيع أن تميز بين أنواع الأحداث المختلفة الناتجة عن إشعاع الخلفية وعن نكوص الذرات (أو النوى إذا تحدثنا بدقة) وهي ترتد بفعل الاصطدام مع جسيمات النيوترالينو بمثل نوع اصطدام كرات البلياردو. ها هنا يكون موضع استخدام تكنيكات موجات الصوت وارتفاع درجات الحرارة التي وصفناها فيما سبق.

على الرغم من كل هذه الصعوبات، فإن أكثر ما يقلق فريق بولبي ليس أن كشافاتهم ستفشل في الكشف عن جسيمات النيوترالينو، وإنما أكثر ما يقلقهم أن جهاز اصطدام الهادرون الكبير قد يتغلب عليهم في هذا الكشف. جسيمات النيوترالينو يمكن حسب ما لها بالضبط من كتلة أن تنتج في الاصطدامات بين حزم البروتونات في «سيرن» التي ستجرى قبل نهاية أول عقد من القرن الحادي والعشرين، إلا أن من الصعب صنع الجسيمات الثقيلة، وإذا كانت كتلة النيوترالينو بالثقل كما تطرح نماذج «سوسي» المفضلة يكون من المرجح أن يتم اكتشاف الجسيمات أولًا في منجم بولبي، أو في إحدى التجارب المماثلة التي تجرى الآن في أرجاء العالم.

حتى إذا حدث فعلًا في تجربة بولبي، أو إحدى التجارب الأخرى عن المادة المظلمة، أن عُثر على النيوترالينو المراوغ، فإننا عندها سنظل نعرف فحسب تركيب ٣٠ في المائة من الخامة التي تجعل الكون مسطحًا. بحلول منتصف تسعينيات القرن العشرين، أصبح من الواضح فعلًا من المقارنة بين محاكيات تجمّع المجرات عنقوديًا وبين خرائط الكون الواقعي أنه لا

يمكن أن يوجد أكثر من حوالي ٣٠ في المائة من كثافة التسطح في شكل مادة (باريونية أو غير باريونية) تتكتل معًا مثلما في المجرات، كما أصبح من الواضح أيضًا أن أحد شروط التضخم هو أن الكون لا بد أن يكون مسطحًا. على أي حال، كما سبق أن ناقشنا في الفصل الثالث، أصبح الكثيرون من علماء الكونيات يشعرون من زمن طويل بأن الكون لا بد أن يكون على وجه الدقة مسطحًا، لأن أي انحراف عن التسطح سوف يتنامى بسرعة أسية مع تمدد الكون بعيدًا عن الانفجار الكبير. هذه حجة قد أثرت فيّ بكل تأكيد منذ أيام دراستي في ستينيات القرن العشرين. أي واحد يشارك في هذا الرأي عليه أوتوماتيكيا أن يوافق على أن نسبة السبعين في المائة الأخرى من الكون لا بد أن تكون في شكل خامة متناسقة تمامًا وغير مكتلة وليس لها أي تأثير رئيسي في تشكيل المجرات (لأنها لا تصنع «ثقوبًا وعائية») ولكنها تؤثر بالفعل في بنية الزمكان. لحسن حظ علماء الكونيات هؤلاء أن ألبرت أينشتاين قد اكتشف ما يلائم مطلبهم بالضبط منذ عام ١٩١٧، وإن كان أينشتاين قد صنع اكتشافه لسبب آخر خاطئ ونبذه بعدها بالكامل.

أكمل أينشتاين نظريته للنسبية العامة في ١٩١٦. هذه نظرية تصف التفاعل بين المادة، والمكان، والزمان وهو تفاعل يعمل من خلال الجاذبية. ما إن اكتملت نظرية أينشتاين حتى كان أول ما فعله بها هو أنه طبقها ليوفر وصفًا رياضيًا لأكبر شيء في الوجود يشمل المادة، والمكان، والزمان — أي الكون. (هناك فهم بأن النظرية العامة تنطبق انطباقًا مثاليًا على ما هو فقط وصف لكون كامل، ليس له أحرف — أي ظروف حدية — تكون مبعثًا للانزعاج، ومن ثم كان من الطبيعي أن يفعل أينشتاين ذلك). كان هذا في ١٩١٧، ووقتها كان الكثيرون من علماء الفلك ما زالوا يعتقدون أن مجرتنا درب التبانة هي كل الكون، وكانت بقع الضوء المضببة المعروفة وقتها باسم السدم ما زالت تنتظر أن يتم تعينها كمجرات أخرى وراء درب التبانة. المعرفة المتفق عليها وقتها هي أن الكون أساسًا استاتيكي ولا يتغير — قد تولد النجوم المفردة، وتعيش دورة حياتها ثم تموت (مثل الأشجار المفردة في إحدى الغابات)، إلا أن «غابة» درب التبانة تظل دائمًا موجودة ولها المظهر العام نفسه.

اصطدم أينشتاين في التو بعقبة. فمعادلاته، معادلات نظرية النسبية العامة، لم تكن، في أبسط صيغة لها، تسمح بإمكان وجود كون استاتيكي. تتضمن المعادلات في الداخل من بنيتها هي نفسها وصفًا لكون يتمدد، والجاذبية فيه تعمل على إبطاء هذا التمدد، ووصفًا لكون يتقلص، والجاذبية فيه تعمل على التعجيل بهذا التقلص. بينما لا يوجد أي وصف لكون يتوازن على حرف سكين بين هذين السيناريوهين. الطريقة الوحيدة لوجود هذا الكون المتوازن هي لو كان هناك بعض تأثير مضاد لشد الجاذبية يؤدي بالفعل إلى إلغاء الجاذبية ويتيح لكل شيء أن يبقى معلقًا في مكانه، وقد توازن على حرف السكين ما بين التمدد والتقلص. على أن إضافة أصغر تعقيد ممكن إلى المعادلات، إضافة رقم أسماه أينشتاين الثابت الكوني، سيجعل هذا التوازن ممكنًا. (الثابت الكوني هو في الواقع أبسط إضافة ممكنة للمعادلات، فهو مثل لما يعرف بأنه «ثابت التكامل»). على الرغم من أن أينشتاين لم يعبّر عنه قط بهذه الكلمات، إلا أن الثابت الكوني هو في الواقع قوة مضادة للجاذبية، أو مجال مضاد للجاذبية، ويملأ نموذج الكون كله في اتساق، الرقم الذي يظهر في المعادلات يمكن من حيث المبدأ أن تكون له أي قيمة، بشرط أن يكون ثابتًا، وقد أطلق عليه أينشتاين اسم الحرف الإغريقي «لامدا» (λ)، إلا أن هناك قيمة واحدة معينة للامدا تفعل التوازن المطلوب لإبقاء نموذج كونه في حالة ستاتيكية.

على أنه في غضون عشر سنوات من وقت أن أضاف أينشتاين الثابت للمعادلات، أثبت عالم الفلك الأمريكي إدوين هابل أن هناك مجرات أخرى وراء درب التبانة. بحلول أوائل ثلاثينيات القرن العشرين اكتشف هابل وهو يعمل مع ميلتون هيوماسون أن الكون يتمدد، كما تكشف عن ذلك الإزاحة الحمراء للضوء الآتي من هذه المجرات الخارجية. على أي حال اتضح أن الكون ليس استاتيكيًا، ونبذ أينشتاين في التو الثابت الكوني، إلا أنه على مر السنين كان هناك علماء كونيات آخرين، اهتموا بالرياضيات أكثر من الاهتمام بما إذا كانت المعادلات تصف الكون الذي نعيش فيه، وواصل هؤلاء العلماء النظر في أمر التغيير.

مجال لامدا مثل كل المجالات له طاقة مصاحبة له، والطاقة تساوي الكتلة، ويمكنها أن تشوه الزمكان. ومن ثم فإن مجال لامدا يمكنه أن

يساهم في تسطيح الزمكان. كما يمكنه أيضًا أن يعمل كمضاد للجاذبية ويجعل نموذج الكون الذي يصفه يتمدد بسرعة أكبر. كانت هذه الأفكار تترقب محومة عندما اكتشف خبراء تكوين المجرات في منتصف تسعينيات القرن العشرين، أنهم حتى يجعلوا محاكياتهم تتوافق مع الكون الواقعي، فإنهم يحتاجون إلى نماذج مصنوعة بنسبة ٤ في المائة من الباريونات، وبنسبة ٢٦ في المائة من مادة مظلمة متكتلة، و٧٠ في المائة من شيء آخر ناعم. إذا كان هذا الشيء الآخر هو مجال لامدا، فسيكون من الممكن جعل المحاكيات متوافقة توافقًا تامًا مع المظهر المرصود للكون، وكل ذلك داخل إطار نظرية النسبية العامة. سميت هذه النماذج بأنها نماذج لمبدا للمادة المظلمة الباردة، واعتبرت نجاحًا عظيمًا، على الأقل فيما بين الخبراء ذوي الدراية. كانت هناك شكوك قليلة حول تنشيط فكرة قد هجرها أينشتاين، فكان هناك في الخارج من جماعة صانعي النماذج علماء فلك ليسوا متأكدين تمامًا من مدى دقة عملية النمذجة. نتج أيضًا عن هذا كله تنبؤ غريب وإن كان مثيرًا للاهتمام — وبلغ من غرابته أنه نادرًا ما كان يناقَش. إذا كان هناك حقًا مجال لامدا يملأ كوننا، وله طاقة عامة تساوي تقريبًا ضعف الكمية المجتمعة للطاقة — الكتلة في الباريونات والمادة المظلمة الباردة، فإنه ينبغي أن يكون لطبيعة هذا المجال التنافرية تأثير ملحوظ عند حواف الكون المرصود — ينبغي أن يجعل الكون يتمدد بسرعة تتزايد مع تزايد عمره، لأن التأثير المضاد للجاذبية سيأخذ في التغلب على تأثير الجاذبية.

النقطة المهمة هي أن الثابت الكوني هو هكذا بالضبط — إنه «ثابت». وهو أيضًا صغير جدًّا. ولكن الجاذبية تخضع لقانون التربيع العكسي، فتزداد ضعفًا مع تزايد بعد المسافة. عندما كان الكون صغير السن (دعنا لا نخجل هنا من الرجوع إلى نماذج؛ فهذا ما نعتقد أن الكون الواقعي يكون عليه) والمادة محزومة فيه معًا بإحكام أكثر مما هي عليه الآن، كان تأثير الجاذبية بالغ القوة حتى إنه يتغلب على قوة لامدا. إلا أن الكون وهو يتمدد، ويغدو أقل كثافة، فإن تأثير الجاذبية يتزايد ضعفه باطراد، إلى أن يصبح أضعف من قوة لامدا. من ذلك الوقت فصاعدا، بدلًا من أن تؤدي الجاذبية إلى إبطاء تمدد الكون، ستعمل قوة لامدا على تسريع تمدد الكون.

على أنه لم يكن هناك أحد تقريبًا يفكر كثيرًا بشأن هذا الأثر الموجود من أول الأمر في نماذج لامدا للمادة المظلمة الباردة، كما أنه بالتأكيد لم يكن مما يدور بذهن فرق علماء الفلك المختلفة، الذين لهم خلفيات مختلفة تمامًا عن خلفيات علماء الكونيات وجماعة صنع النماذج، وكان علماء الفلك وقتها عند نهاية تسعينيات القرن العشرين يحاولون قياس مسافات بعد تفجرات السوبرنوفا البعيدة على أقصى حد.

محاولات مد مقياس المسافات الكونية بقياس مسافات للأجرام عبر الكون تتزايد بعدًا، وهي محاولات ذات تراث مشرف يرجع إلى هابل نفسه. كان هابل هو الذي اكتشف أن الإزاحة الحمراء في الضوء الآتي من إحدى المجرات تتناسب مع مسافة بعدها عنا — إلا أن هابل من أجل أن يكتشف ذلك كان عليه أن يقيس مسافة بعد مجرات مجاورة قريبة نسبيًّا باستخدام أنواع أخرى مختلفة من التكنيكات. هذه المعايرة لمقياس المسافات الكونية كانت أمرًا صعبًا للغاية بسبب أن المجرات الأكثر بعدًا تبدو أشحب وتصعب دراستها. لم يكتمل في النهاية المشروع الذي بدأه هابل إلا في أواخر تسعينيات القرن العشرين، بعد رصد مجرات أبعد كثيرًا من أي مما أمكن لهابل رؤيته، وقد رصدت بواسطة تلسكوب الفضاء الذي سمي باسمه تشريفًا له. هناك أيضًا أمر بارع آخر. «قانون هابل» في أبسط صيغة له كما هو معروف، ينطبق فقط على المجرات التي ترتد بعيدًا عنا بسرعة أقل من حوالي ثلث سرعة الضوء. بما يقابل إزاحة حمراء قدرها ٠,٣.

بالنسبة للإزاحات الحمراء الصغيرة، يمكن أن نتصور الإزاحة على أنها حاصل قسمة سرعة الارتداد على سرعة الضوء — ومن ثم فإن إزاحة حمراء قدرها ٠,١ تعني أن المجرة ترتد بسرعة هي عُشر واحد من سرعة الضوء. أما الإزاحة الحمراء بمقدار ١ فإنها لا تعني أن المجرة ترتد بسرعة الضوء، وذلك لأن العلاقة بالإزاحة الحمراء هي في الواقع ليست خطية. كما سبق أن ذكرنا على نحو عابر، فإن هابل لم يلاحظ ذلك لأن أرصاده كانت تمتد فقط إلى إزاحات حمراء تقابل معدل سرعات ارتداد بنسبة مئوية قليلة من سرعة الضوء. العلاقة المضبوطة بين الإزاحة الحمراء والمسافة يمكن حسابها باستخدام النظرية العامة النسبية (هذا هو تنبؤ النظرية العامة

الذي تجاهله أينشتاين عندما أدخل الثابت الكوني)، وهذا الحساب يضع في الاعتبار عدم خطية هذه العلاقة. عندما نتحدث على وجه الدقة، فإن عدم الخطية ينطبق على كل الإزاحات الحمراء، إلا أن التصحيح المطلوب يكون أصغر من أن يستحق الاهتمام عند الإزاحات الحمراء الصغيرة. ومن ثم فإن إزاحة حمراء بمقدار ٢ تقابل معدلًا لسرعة الارتداد يبلغ ٨٠ في المائة من سرعة الضوء (وليس ضعف سرعة الضوء)، في حين أن إزاحة حمراء بمقدار ٤ تقابل معدل سرعة هو فقط بنسبة ٩٢ في المائة من سرعة الضوء. سيحتاج الأمر إلى إزاحة حمراء مقدارها مالانهاية لتقابل معدل سرعة ارتداد يساوي بالضبط سرعة الضوء. أشعة خلفية الكون الميكروويفية لها كما سبق أن ذكرنا إزاحة حمراء قدرها حوالي الألف، وهذا يعني أن حجم الكون خطيًا هو الآن أكبر بألف مرة مما كان عليه عندما انبعث الإشعاع، بعد الانفجار الكبير بمئات ألوف قليلة من السنين.

مع البحث الذي لا ينتهي لقياس الإزاحات الحمراء لأجرام بعيدة يمكن تحديد مسافة بعدها بوسائل أخرى، أخذ أفراد فرق علماء الفلك في تسعينيات القرن العشرين يستخدمون آخر تكنولوجيا للتلسكوبات لدراسة الضوء الآتي من الانفجارات النجمية المعروفة باسم السوبرنوفا. السوبرنوفا تعد أكبر تفجرات تمت رؤيتها بأي حال لنجوم عادية. وهي تحدث عند نهاية حياة بعض النجوم عندما يتقلص النجم ويطلق تفجرًا هائلًا من الطاقة الجذبوية، التي تتحول إلى ضوء وأشعة أخرى ويتفجر النجم. النجم الواحد الذي ينفجر بهذه الطريقة يظل زمنًا قصيرًا يشع ضوءًا كثيرًا مثل ما تشعه مجرة نجوم بأكملها من نوع درب التبانة (يكون هذا الضوء بالمعنى الحرفي ألمع من مائة مليار شمس)، وهكذا فإن هذه المنارات الضوئية يمكن رؤيتها على مسافات بالغة البعد عبر الكون. هناك أنواع عديدة مختلفة من السوبرنوفا، على أن الدراسات التي أُجريت على هذه الانفجارات النجمية في مجرات قريبة تُعرف جيدًا مسافة بعدها تبين أن أحد أنواع السوبرنوفا الذي يسمى SN IA، له دائمًا نفس الذروة من اللمعان. يعني هذا أنه عند رؤية هذا النوع من السوبرنوفا في مجرة بعيدة جدًا، فإن لمعانه الظاهري يمكن مقارنته بلمعانه الحقيقي المعروف لاستنتاج مسافة بعده. وعندها

فإن هذا القياس المباشر للمسافة يمكن مقارنته بالإزاحة الحمراء لمعايرة مقياس المسافة عند مسافات بعد كبيرة جدًّا — في هذه الحالة تقابل عبارة «كبيرة جدًّا» إزاحات حمراء مقدارها تقريبًا «١»، (عندما كان حجم الكون نصف حجمه الحالي)، على الرغم من أن الرقم القياسي المسجل لقياس الإزاحة الحمراء لمجرة هو رقم مذهل قدره عشرة.

عندما نُفذت هذه الأرصاد، وجد الباحثون أن «س ن ١أ» عند الإزاحات الحمراء الكبيرة جدًّا يكون أشحب قليلًا مما «ينبغي» أن يكون عليه، عند مسافات بعد هذه الإزاحات الحمراء التي تحسب وفقًا للنظرية العامة. أحد تفسيرات ذلك هو أن المجرات التي رؤيت فيها هذه السوبرنوفات تبتعد عنا بمسافة أكبر قليلًا من المسافات المحسوبة وفقًا لأبسط نسخة من النظرية العامة. إلا أن مجرد تعديل بسيط واحد للنظرية العامة هو ما يُطلب لجعل الأرصاد تتلاءم مع الحسابات. إضافة ثابت كوني صغير ستجعل الكون يتمدد بمعدل أسرع قليلًا، بما ينقل هذه المجرات البعيدة مسافةً أبعد قليلًا عنا في الزمان ما بعد الانفجار الكبير.

اكتشاف أن تمدد الكون يتسارع تصدر عناوين الصحف في ١٩٩٨ (فأشادت به مجلة ساينس على أنه «الطفرة الهائلة لهذا العام») وتناقلته وسائل الإعلام على نطاق واسع (حتى المجلات العلمية) بأساليب تشير إلى أن علم الكونيات قد قُلب رأسًا على عقب، وأن علماء الكونيات في حيرة. كان هذا نبأ جديدًا على مسامع الكثير من علماء الكونيات الذين كانوا يحاولون العثور على تفسير لنسبة السبعين في المائة «المفقودة» في الكون، والذين بدا لهم أن إعادة الثابت الكوني تكاد تكون أبسط حل للغز. وعلى أي حال فإن فكرة الثابت ظلت مطروحة منذ زمن أينشتاين، ونوقشت في كل المراجع المحترمة لعلم الكون. النقطة المهمة هي أن مجال لامدا — مثل أي مجال في الفيزياء — يحوي طاقة، والطاقة تساوي الكتلة، والثابت الكوني الذي له مقدار مناسب هو بالضبط ما يلزم لجعل الكون مسطحًا. وأهم ما في الأمر هو أن ثابتًا كونيًّا له بالضبط المقدار نفسه قد ثبت في النهاية أنه ما يلزم بالضبط ليفسر أيضًا أرصاد الإزاحة الحمراء الكبيرة للسوبرنوفا. المفاجأة الحقيقية (على الأقل بالنسبة لي) هي أن عددًا كبيرًا من علماء الفلك كانوا

يجهلون إلى حد بعيد تاريخ مادة تخصصهم (حتى تاريخها الحديث) حتى إن الأمر استغرق زمنًا طويلًا (نحو خمس سنوات، وإن كان هذا ليس بالزمن بالغ الطول بالمقارنة بعمر الكون) حتى يدرك الجميع كيف يتفق هذا كله تمامًا معًا، حتى إن كان يتطلب إعادة التفكير في طبيعة الكون ومصيره النهائي.

لا شك أني هنا أظهر شيئًا من القسوة. علماء الفلك كان يحق لهم أن يبدوا تشككًا حول نتائج الإزاحات الحمراء العالية للسوبرنوفا إلى أن يتم اختبار التفسيرات الأخرى الممكنة، ووفود أدلة أخرى مستقلة وداعمة، حتى وإن كان هناك دراستان مستقلتان قد عثرتا على الظاهرة نفسها. من الاعتراضات مثلًا أن السوبرنوفات البعيدة قد تبدو شاحبة لأن هناك غبارًا يعتم عليها، أو أن السوبرنوفات ربما كانت تتفجر بلمعان أقل عندما كان الكون أصغر سنًا (دعنا نتذكر أن الإزاحة الحمراء الكبيرة تقابل نظرة كبيرة إلى الوراء في الزمان). هذه الاحتمالات قد تم الآن استبعادها، وذلك إلى حد بعيد كنتيجة لأبحاث حفزت عليها دراسات السوبرنوفا.

هناك أدلة على أن نسبة ٧٠ في المائة من الكون هي حقًا في شكل ما أصبح يُعرف «بالطاقة المظلمة»، وعلى أن تمدد الكون يتسارع نتيجة لذلك، وهذه الأدلة كلها قد أتت الآن أيضًا من دراسة الطريقة التي تتحرك بها المجرات بالمقياس الكبير، ومن دراسات الأقمار الصناعية لأشعة الخلفية الميكروويفية التي ناقشناها من قبل، كما أتت من تكنيك رائع يسمى بالظاهرة المتكاملة لساكس-وولف، وهو تكنيك ينظر إلى الأشعة الميكروويفية التي «تسطع» خلال انبعاجات في الفضاء يسببها وجود تجمعات عنقودية من المجرات، بمثل سطوع الضوء من خلال عدسة زجاجية. هناك إزاحة بسيطة في طول موجة هذه الأشعة بالمقارنة بأشعة الخلفية التي تأتي إلينا بدون المرور خلال هذه الانبعاجات، ويكشف هذا عن أن الانبعاجات أكثر تسطحًا عما لو كانت بدون التأثير الصغير للقوة المضادة للجاذبية التي تعمل حتى في داخل التجمعات العنقودية للمجرات. هناك أيضًا رصد واحد لا غير لسوبرنوفا من نوع (IA) عند إزاحة حمراء مقدارها ١,٧٦، ويتفق هذا مع التنبؤات بالتمدد المتسارع ولكنه لا يتفق مع التفسيرات الأخرى، مثل

التعتيم بواسطة الغبار. هذا الرصد الوحيد (الذي نأمل أن يكون أول واحد من أرصاد أخرى كثيرة عند إزاحات حمراء كهذه) رصد يتسق تمامًا مع فكرة أن تمدد الكون قد أبطأ خلال أول أربعة أو خمسة مليارات عام بعد الانفجار الكبير ثم يأخذ التمدد في التسارع بعدها.[5] الأدلة على أن أكثر ما يجعل الكون مسطحًا هو في الواقع الطاقة المظلمة هي أدلة بالغة القوة. وهذا يستدعي أن نتساءل، ما الطاقة المظلمة؟

أبسط التخمينات وأكثرها طبيعية هو أن الطاقة المظلمة هي حقًّا ثابت أينشتاين الكوني — على أن هذا حتى الآن ليس إلا تخمينًا بارعًا. أهم ملمح في مجال لامدا (λ)، إذا كان له وجود بالفعل، هو أنه حقًّا ثابت وله القوة نفسها منذ الانفجار الكبير. وبكلمات أخرى، فإنه نتيجة لأن الثابت الكوني هو خاصية للفضاء نفسه، فإن كمية هذا النوع من الطاقة المظلمة في كل سنتيمتر مكعب من الفضاء تبقى هي نفسها أثناء تمدد الكون، في حين أن كثافة المادة (المضيئة «و» المظلمة) تقل مع تمدد الكون. أثناء كرة نيران الانفجار الكبير، عندما كانت كثافة المادة مساوية لكثافة نواة ذرية حاليًّا، كان تأثير الثابت الكوني في تمدد الكون صغيرًا بما يمكن إهماله. ظل التأثير المسيطر لمليارات السنين هو تأثير جاذبية المادة الذي يؤدي إلى إبطاء سرعة تمدد الكون. إلا أن هذا التأثير أخذ يزداد ضعفًا بمرور الزمن، في حين أن قوة التنافر الكوني المصاحبة لمجال لامدا (λ) بقيت كما هي. حاليًّا أصبحت المادة بسمك بالغ الصغر إلى حد أن أصبحت كثافتها حوالي النصف فقط من كثافة مجال لامدا، وبدأ مجال لامدا في التو يصبح هو المسيطر على التمدد (منذ مليارات قليلة من السنين)، وتغلب بشدة على تأثير المادة ليجعل التمدد يتسارع. هناك حقيقة مثيرة للاهتمام، وربما تكون لها دلالتها (وسوف نعود إليها فيما بعد) ومفادها أنه ينبغي أن يحدث أن نكون موجودين ها هنا لنلاحظ أمورًا كهذه تحدث في الوقت الوحيد من كل عمر الكون عندما تكون المادة والطاقة المظلمة في حالة توازن تقريبًا.

---

[5] فيما يعرض، إذا كان تمدد الكون يتسارع، فلا بد إذن من أن يكون عمر الكون أكبر قليلًا من ١٣,٨ مليار سنة (أكبر قليلًا فحسب). تم احتساب عمر الكون بافتراض أنه لا يوجد تسارع، أما إذا كان الكون يتمدد الآن بأسرع مما في الماضي، حيث كان يتمدد وقتها بسرعة أبطأ فلا بد أنه استغرق زمنًا أطول قليلًا للوصول إلى حجمه الحالي.

بتقريب الأرقام إلى أعداد صحيحة، تكون الكثافة اللازمة لجعل الكون حاليًا مسطحًا هي ١٠^-٢٩ من الجرام لكل سنتيمتر مكعب، بحساب المتوسط عبر الكون كله. يساوي هذا ما يقرب من خمس ذرات من الهيدروجين لكل متر مكعب من الفضاء، إذا كانت هذه الذرات موزعة كلها بالتساوي، إلا أن المادة (المضيئة والمظلمة معًا) تتكتل في كتل لها كثافة أكبر كثيرًا من ذلك، تاركة فراغات حيث تكون الكثافة أقل كثيرًا. نجد في تناقض مع ذلك أن مجال لامدا «يكون بالفعل» موزعًا بالتساوي في كل الكون، بحيث يكون هناك طاقة تساوي ما يقل بالكاد عن ١٠^-٢٩ من الجرام في كل سنتيمتر مكعب من أي شيء، بما في ذلك الفضاء «الخاوي». هذا مقدار يبلغ من صغره أنه يجعل من المستحيل واقعيًا الكشف عن الطاقة المظلمة في المعمل، ويجعلها غير مفيدة مطلقًا كمصدر محتمل للطاقة يستخدم في الحضارة البشرية — مقدار الطاقة المظلمة الذي يحويه كل حجم الأرض سيكون كافيًا فسحب لأن يوفر تقريبًا ما يكفي لاستهلاك الكهرباء سنويًا للمواطن المتوسط بالولايات المتحدة سنة ٢٠٠٥. الطاقة المظلمة الموجودة في كرة يبلغ حجمها بالعرض حجم المنظومة الشمسية كلها، إذ تتضايف كلها معًا تبلغ فقط مقدارًا من الطاقة يساوي الطاقة التي تنتج عن الشمس نفسها في ثلاث ساعات. على أنه كنتيجة لأن الطاقة المظلمة تملأ «كل» سنتيمتر مكعب من الكون، فإنها الآن تهيمن على سلوك الكون بالمقاييس الكبيرة. وهي أيضًا كانت ستهيمن بالمقاييس الصغيرة لو كانت المادة غير موجودة هنا وهناك لتمارس شدًّا جذبويًا. أي منطقة من الفضاء تخلو تمامًا من أي مادة ستظل تحوي طاقة مظلمة، وسوف تمتط بمعدل سرعة متزايد. لو وضعنا جسيمين ضئيلين في حيز من الخواء كهذا، فسوف يتحركان أحدهما بعيدًا عن الآخر حركة أسرع وأسرع، مدفوعين «بالزنبرك المتمدد» للطاقة المظلمة.

هناك بديل واحد للثابت الكوني يأخذه بعض علماء الفلك مأخذًا جديًا وكذلك عدد أكبر نوعًا من علماء فيزياء الجسيمات. هذا البديل هو إمكان وجود بعض شكل من الطاقة المظلمة التي «ليست» ثابتة. المرشحون لهذا النوع من الطاقة المظلمة يشار إليهم جميعًا على أنهم الأثير أو العنصر

الخامس quintessence لأن المجال اللازم هنا سيكون مجال القوة الخامسة الموجودة في الطبيعة مع قوى الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والقوى النووية القوية والضعيفة.[٦] الملمح المهم في الأثير هو أنه دائمًا له الكثافة نفسها مثل المادة، فتقل كثافته كلما قلت كثافة المادة مع تمدد الكون، بحيث تكون له أهميته وقت الانفجار الكبير (في علاقته بالمادة) بمثل ما له بالضبط من الأهمية في الوقت الحالي، ومن ثم فإنه ليس مصادفة أننا نكون فيما ينبغي أحياء في الوقت الذي تكون فيه المادة هي والطاقة المظلمة لهما تقريبًا الكثافة نفسها. ولكن لماذا عند ذاك ينبغي بأي حال أن يكون للمادة والطاقة المظلمة الكثافة نفسها تقريبًا؟

نادرًا ما يجد علماء فيزياء الجسيمات أي صعوبة في أن يحلموا بمجالات جديدة وأن يجدوا معادلات رياضية جديدة لوصفها. تأتي الصعوبات عندما يحاولون التوفيق بين أفكارهم التخمينية والواقع. من السهل أن نكتب مجموعة من المعادلات تصف مجالًا كموميًّا «جديدًا» يملأ الكون كله ويعمل وكأنه زنبرك مضغوط يندفع إلى الخارج. هناك بديل آخر لهذا المجال أكثر براعة، يحاول أن يفسر لماذا ينبغي أن نكون ها هنا وندرس الأمور في وقت هو بالضبط عندما يبدأ التمدد في التسارع، ويسمى هذا المجال بأنه المجال «المقتفي الأثر». في غضون الفترة التي هيمن فيها الإشعاع على الكون، نجد أن المجال المقتفي الأثر «يقتفي أثر» سلوك الإشعاع، بحيث إن كثافة طاقته الخاصة به تنخفض بالمعدل نفسه الذي تنخفض به كثافة طاقة الإشعاع. أما عندما تهيمن المادة على الكون، بالطريقة التي وصفناها فيما سبق، فإن المجال «المقتفي الأثر» يبدأ بدلًا من ذلك في اقتفاء أثر الكثافة المتغيرة للمادة. حسب هذه الصورة، يُقدح زناد تكوين النجوم والكواكب مع بدء هيمنة المادة، ومع الاختيار المناسب للخواص، يبدأ الجانب المضاد للجاذبية للمجال المقتفي الأثر في أن تصبح له أهميته بعد بدء هيمنة المادة. ومن ثم لن يثير الدهشة أن يكون الأفراد الذين يعيشون فوق الكواكب موجودين مبكرًا في فترة تسارع التمدد.

---

[٦] الاسم quintessence مأخوذ عن قدماء الإغريق، وكانوا يعتقدون أن المادة مصنوعة من أربعة «عناصر» (النار، والتربة، والهواء، والماء) بينما يمتلئ الكون «بعنصر» خامس هو الأثير quintessence. كان يعتقد أن الأثير مادة مثلى، ومن هنا أعطتنا مصطلح quintessential (الجوهري أو اللب).

على أن الكلمات المفتاح هنا هي «مع الاختيار المناسب للخواص». هناك ببساطة حرية بقدر بالغ مع المجالات المقتفية الأثر، أو مع التنويعات الأخرى على لحن «الأثير»، حرية في التقاط واختيار الأجزاء التي تناسبك. برطانة الفيزيائيين، هناك قدر بالغ الكثرة من المعلمات الحرة، ويمكنك أن تجعل «الأثير» يتلاءم مع أي سيناريو. الأمر كله فيه تعقيد وتحايل وما لا يقبل التصديق. هناك صعوبات مماثلة في اقتراح، هو فيما عدا ذلك جذاب، ويطرحه منظرو نظرية إم ويتحايل هؤلاء المنظرون بإنشاء نماذج نجد فيها أنه بدلًا من أن تكون القوة المضادة للجاذبية هي التي تسّرع التمدد، فإن الجاذبية نفسها (في شكل جرافيتونات) تتسرب بعيدًا من «البران» الخاص بنا ويزداد تسربها أكثر وأكثر بمرور الزمن، بحيث إن الجاذبية تغدو أكثر ضعفًا بمرور الزمن، فتضعف قبضتها على المجرات البعيدة. الثابت الكوني هو على عكس هذا كله بسيط، ويشكل جزءًا طبيعيًا من نظرية النسبية العامة لأينشتين، بل يقول البعض إنه جزء حتمي منها. المعلم الحر الوحيد في المعادلة هو اختيار الكمية المناسبة لكثافة الطاقة في مجال لامدا لتتوافق مع التسارع الملاحظ للكون ولتسطح الزمكان. إذن فاللغز الرئيسي هو، ما السبب في أن كثافة الطاقة في مجال لامدا صغيرة هكذا؟

لا يوجد في نظرية المجال الكمومي أي مشكلة في تفسير السبب في أن «الفضاء الخاوي» ينبغي أن يحوي طاقة. المشكلة في تفسير السبب في أنه لا يحوي طاقة أكثر كثيرًا. هذه الطاقة التي تسمى طاقة الفراغ تنشأ طبيعيًا في سياق النظريات الموحدة الكبرى والسمترية الفائقة. ليس هناك في أي من هذا ما يقول إن طاقة الفراغ لا بد أن تكون صفرًا، وإنما لا بد فقط من أن توجد متماثلة في كل مكان. نستطيع هنا أن نعود ثانية إلى ضرب مثل بحيرة الجبل. تبدو النظرية وكأنها تقول إن سطح البحيرة لا بد أن يكون مسطحًا، ولكن لا يلزم أن يكون هذا السطح على مستوى سطح البحر. المشكلة هي أن الطاقة «الطبيعية» المتضمنة هكذا لها مقاييس أكبر بدرجة هائلة من كثافة الطاقة اللازمة لتفسير تسطح الكون. وكمثل، فإن طاقة الفراغ هذه المصاحبة للجاذبية الكمومية سينتج عنها كثافة طاقة تساوي 10^{108} من وحدات الإلكترون فولت المعتادة عند علماء فيزياء الجسيمات.

هذا النوع من طاقة الفراغ هو الذي يسوق التضخم، من خلال النوع نفسه من العمليات التي تعمل الآن في الكون ولكنها بمقياس أقل قوة إلى حد هائل. سيقول بعض علماء الكونيات إن الكون يمارس الآن بالمعنى الحرفي شكلًا ضعيفًا من التضخم — وقد يبدو هذا بارعًا، بل ربما يكون حقيقيًّا، ولكنه لا يضيف بالفعل أي شيء لفهمنا. وإذا كان يضيف أي شيء، فهو أنه فحسب يلقي الضوء على لغز مفاده أن «التضخم» الآن بالغ الضعف. سنجد حتى عند مستوى الطاقة المصاحبة للنظريات الموحدة الكبرى، أن كثافة الطاقة ستكون ١٠^٩٦ بالوحدات نفسها، في حين أن أصغر طاقة فراغ «طبيعية» تكون فقط ١٠^٤٤ حسب النسخ الراسخة من السمترية الفائقة. بهذه الوحدات، تكون القيمة الفعلية المرصودة لكثافة طاقة الفراغ هي ١٠^-١٢. وبكلمات أخرى، نجد أن أصغر كثافة لطاقة الفراغ «الطبيعية» هي أكبر بـ ١٠^٥٦ ضعف لما يُرصد من كثافة طاقة الفراغ.

بصرف النظر عن أي اعتبار آخر، فإن طاقة فراغ تكون بالحجم الكبير الذي تطرحه السمترية الفائقة، سوف تنتج تأثيرًا مضادًا للجاذبية يؤدي إلى تمزيق الكون المادي بدءًا قبل أن يكون هناك أي أمل في تشكيل اللاتناسقات مثل المجرات، والنجوم، والكواكب. ومن ثم لا يكاد يدهشنا أنه قبل وصول أرصاد سوبرنوفات س ن ا أ، كان معظم علماء فيزياء الجسيمات يفترضون أن هناك بعض ميكانزم عام لكبح الطاقة قد أدى إلى دفع طاقة الفراغ إلى مواصلة الانخفاض لتصل إلى الصفر، بدلًا من أن تخلف وراءها أي بقية ضئيلة. على أن كثافة الطاقة المظلمة موجودة بمقدار ليس بالصفر وإنما هو مقدار صغير جدًّا، وهذا فيه حقًّا لغز حقيقي بالنسبة للمنظرين. على أن هناك خط مثير للاهتمام للهجوم على المشكلة، ربما يكون فيه ما يثمر. طاقة الفراغ الفعلية هي تقريبًا بالقدر الملائم للتوافق مع أي مما لم يرصد من تكسير للسمترية يصاحب الطاقات التي تناظر كتلًا من أجزاء قليلة من الألف من إلكترون فولت واحد — وهي بالضبط الكتل التي يعرف الآن أنها تصاحب جسيمات النيوترينو. لا يزيد هذا حتى الآن عن إشارة مغرية لحل ممكن للمشكلة، ولعل الأمر فحسب نوع من توافق بالصدفة يوجهنا إلى «الحقيقة العميقة» بشأن الكون.

ينبغي حل الكثير من هذه المسائل خلال السنوات العشرين التالية أو ما يقرب، وذلك باستخدام أجيال جديدة من الأقمار الصناعية التي سترصد ألوف السوبرنوفات القصية البعد، وباستخدام تجارب مقرها فوق الأرض في مواقع مثل «سيرن» ومنجم «بولبي». «علم الكون المعياري الجديد» كما يسمى أحيانًا، يمكن تلخيصه في خمس إفادات:

- الكون الذي نعيش فيه قد انبثق من فترة مبكرة من التمدد السريع (التضخم)، ثم أبطأ في معدل سرعة تمدده.
- الكون الآن مسطح وتمدده في تسارع.
- اللاتناسقات في الكون الآن (المجرات، والنجوم، وكل الباقي وفي ذلك نحن) تنتج عن تراوحات كمومية أثناء التضخم.
- الكون قد صنع تقريبًا بنسبة ٧٠ في المائة من طاقة مظلمة وثلاثين في المائة من المادة.
- مادة الكون قد صنعت من مادة مظلمة لا باريونية قدرها تقريبًا أكثر من سبعة أمثال المادة الباريونية، بحيث تكون المادة الباريونية بنسبة ١٠ في المائة فقط في شكل نجوم لامعة (بنسبة ٠,٤ في المائة من إجمالي الكتلة-الطاقة في الكون). تساهم جسيمات النيوترينو بكتلة قدرها عمومًا يماثل كتلة النجوم اللامعة.

هكذا نستطيع الإجابة عن السؤال الموضوع في عنوان هذا الفصل. ما يجعل الكون الآن متماسكًا معًا هو في أغلبه الطاقة المظلمة، إلا أنه فيما يبدو كمفارقة، لو استمر تسارع التمدد، فإن الطاقة المظلمة ستؤدي في النهاية إلى أن يتفجر الكون متمزقًا.

ولكن أين يكون الموضع الملائم لنا في كل هذا؟ هل هي مجرد صدفة أن انبثقت الحياة الذكية في الكون في وقت مبكر من فترة التمدد المتسارع، أو هل يخبرنا هذا «بحقيقة عميقة» عن طبيعة الكون؟

نحن بالتأكيد نعيش زمنًا خاصًا في حياة الكون. إذا أخذنا أبسط تفسير للتمدد المتسارع بالثابت الكوني (الأمر الذي سيشجعنا نصل أوكام[7]

---

[7] نصل أوكام مبدأ يوجب ألا تتعدد الكيانات بأكثر مما هو ضروري، والمبدأ على اسم ويليام أوكام، وهو فيلسوف إنجليزي مات عام ١٣٤٩. (المترجم)

على أن نفعله)، نجد أنه منذ عشرة مليارات عام، عند إزاحة حمراء مقدارها ٢، كانت الطاقة المظلمة تساهم في كثافة الكون بنسبة هي فقط ١٠ في المائة، إلا أنه بعد مرور زمن من عشرة مليارات عام ستساهم الطاقة المظلمة بنسبة ٩٦ في المائة من إجمالي الكثافة. سيكون الفارق أكبر من ذلك حتى عند الأوقات الأكثر تبكيرًا أو تأخيرًا، وكمثل فإنه في وقت إعادة الاتحاد كانت كثافة المادة أكبر بمليون مرة من كثافة الطاقة المظلمة. حقيقة أن إسهام الطاقة المظلمة في كثافة الكون الآن يماثل تقريبًا إسهام المادة (في نطاق عامل ٢) هي حقًّا أمر غريب. إلا أن هذا فيه على الأقل ما يفيد الراصدين. التحول من كون يقل تسارعه وتهيمن عليه المادة إلى كون يتسارع وتهيمن عليه الطاقة المظلمة هي حقيقة وقعت بين إزاحة حمراء تساوي ٠,١ وإزاحة حمراء تساوي ١,٧، وهذا يعد على نحو مريح قريبًا منا بحيث يتيح صنع أرصاد تفصيلية لهذا التحول تكون متاحة بالجيل التالي من أجهزة الكشف بالأقمار الصناعية.

يستمر المنظرون في غضون ذلك في حيرتهم حول المقادير المتماثلة من إسهام الطاقة المظلمة والمادة في تسطح الكون. لو كان الثابت الكوني ثابتًا حقًّا، فإن هذا يرادف أن نسأل عن السبب في أن كثافة الطاقة المظلمة تكون بالغة الصغر هكذا. كنتيجة للصغر البالغ لكثافة الطاقة، يكون لمجال لامدا تأثير قليل جدًّا عند الوقت المبكر من تمدد الكون عندما أتيح للنجوم، والمجرات، والتجمعات العنقودية للمجرات أن تتشكل بواسطة التقلص الجذبوي حتى وإن كان الكون يتمدد. كما سنرى في الفصول التالية، استغرق الأمر زمنًا حتى تمر النجوم الأولى بدورة حياتها وتبذر في المجرات المواد الخام اللازمة لتشكيل الكواكب والحياة. ثم استغرق الأمر زمنًا أطول حتى ينبثق الذكاء فوق واحد على الأقل من هذه الكواكب. مع مرور الوقت الذي حدث فيه هذا كله، انخفضت كثافة مادة الكون إلى أقل من كثافة الطاقة المظلمة، وحينها بدأ تسارع التمدد يكون ملحوظًا. على أنه سيحدث في وقت من مستقبل الكون، ليس بالبعيد جدًّا، انطلاق لسرعة تمدد الكون ربما يجعل الحياة مستحيلة، وعلى أي حال لن يتخلف عندها أي شيء يُرَى. الناس كيانات معقدة مثيرة للاهتمام، ونحن نعيش في زمن

هو أكثر أزمنة حياة الكون تعقدًا وإثارة للاهتمام لأن هذا هو الزمن الوحيد الذي يمكن فيه لكائنات مثلنا أن توجد.

على أن هذا كله ينطبق فقط على كثافات صغيرة جدًّا للطاقة المظلمة. بالنسبة لأي قيم أخرى من الكثافة، لن يكون ممكنًا عندها بأي حال أن توجد أشياء معقدة مثيرة للاهتمام مثلنا. لو كانت كثافة الطاقة المظلمة كبيرة، لأدى ذلك إلى تغلبها على التأثير الجذبوي للمادة في الكون المبكر، وإلى بسط المادة بسمك يتزايد رقة في عالم ينطلق متمددًا حيث لن تتكون فيه أبدًا أي نجوم أو كواكب أو أفراد من الناس.

الاحتمال المتطرف الآخر هو أن مجال لامدا يمكن أن يكون «سالبًا». إذا كان مصطلح مجال لامدا الإيجابي يناظر طاقة مظلمة لها قوة مضادة للجاذبية، فإن مصطلح لامدا السلبي يناظر طاقة مظلمة بها نوع إضافي من قوة جذبوية إيجابية. مع وجود تأثير كهذا يتضايف مع تجاذب المادة، فإن كونًا كهذا سوف يتقلص على نفسه في زمن أكثر سرعة من أن يسمح بتشكيل النجوم، والكواكب والناس، ومن ثم فإن لغز مقدار الثابت الكوني يماثل اللغز الذي حير جيلًا سابقًا من علماء الفلك، عن السبب في أن الكون فيما ينبغي يكون مسطحًا، وهو يتوازن على حرف سكين بين تمدد منطلق وتقلص معجل. ثبت في النهائية أن حل اللغز هو في فكرة جديدة تمامًا هي التضخم. أعتقد أن حل لغز الثابت الكوني سوف يثبت في النهاية أنه أيضًا بعض شيء جديد تمامًا، لم يتخيله بعد أي فرد وسوف ينبئنا هذا الشيء الجديد «بحقيقة عميقة» جديدة بشأن طبيعة الكون. على أنه حتى تنبثق هذه الفكرة الجديدة العظيمة، فإن أفضل تفسير لما «يتفق صدفة» حدوثه يأتينا من فكرة تعرف باسم «علم الكون الإنساني أو الكوزمولوجيا الإنسانية». يعتبر بعض العلماء أن هذا بمثابة مداولة يائسة. على أني أميل إلى هذه الفكرة، وهي بكل تأكيد أفضل تفسير لدينا حتى الآن عن السبب في أن الكون يبدو هكذا كأفضل موطن مريح لأشكال من الحياة مثلنا نحن.

الفكرة الأساسية من وراء المبدأ الإنساني هي أن الكون فيه أشياء أكثر كثيرًا مما يمكننا رؤيته، وربما أكثر بما لا نهاية له. ليس هذا بنوع من مزيد من الخامة المظلمة في الفجوات بين النجوم اللامعة، وإنما هو مزيد

من الزمكان بما يتجاوز حدود الكون القابل للرصد. هذا «الكون الفائق» يمكن الإشارة إليه بأنه الكوزموس Cosmos،[8] حتى نتفادى أي تشوش مع كلمة الكون Universe. إن كان الزمكان (أو الكوزموس) لانهائيًّا، سيكون كوننا المتمدد عندها مجرد فقاعة واحدة ضمن بحر لانهائي، ويمكن عندها أن توجد «أكوان» فقاعية أخرى كثيرة، (كثرة لانهائية)، وكل كون منها تم تكوينه بصورة من التضخم خاصة به، وستظل هذه الأكوان الأخرى إلى الأبد غير قابلة لأن نراها أو نلمسها من كوننا. وكما أننا تعلمنا أن منظومتنا الشمسية ليست بالفريدة، وأن مجرتنا درب التبانة ليست بالفريدة، فبمثل ذلك ربما يكون قد حان الوقت لأن ندرك أن كوننا قد لا يكون فريدًا. بعض صور نظرية التضخم تتضمن بالفعل أنه لا بد أن توجد أكوان فقاعية كثيرة من هذا النوع عددها لانهائي في بحر لانهائي من الزمكان، تماثل الفقاعات التي تتشكل في زجاجة مشروب غازي (زجاجة كبيرة كبرًا لانهائيًّا!) عند إزالة الغطاء عنها. تقول المحاجة الإنسانية إن قوانين الفيزياء لا يوجد فيها أي شيء يحدد قيمة معينة ينبغي أن تكون للثابت الكوني — هناك حجج متساوية بالضبط تنطبق على «ثوابت» أخرى في الطبيعة، على أن هذا الكتاب ليس بالمجال المناسب للدخول في تفاصيل قصة الكوزمولوجيا الإنسانية — إذن فالثابت الكوني ستكون له قيم مختلفة في الفقاقيع المختلفة.

الثابت في بعض الفقاقيع (أو بعض الأكوان) يكون كبيرًا، فيتسارع التمدد منذ البداية، ولن تكون هناك أي نجوم، أو كواكب، أو بشر. وفي أكوان فقاعية أخرى يكون الثابت سلبيًّا، وتتقلص الفقاعات قبل أن يكون هناك إمكان لأن تحدث فيها أمور مثيرة للاهتمام مثل الحياة. لن تنبثق الحياة إلا في فقاعات لها ثابت كوني صغير وتكون لها أيضًا الظروف «المناسبة بالضبط». بوجه عام هناك إمكان لوجود أكوان تتنوع إلى حدٍّ هائل، ونحن نعيش في داخل هذا الكوزموس في موقع متاح للبشر.

على الرغم من أن الأفكار عن الكوزمولوجيا الإنسانية قد تلقت دعمًا قويًّا من نظرية التضخم ومن اكتشاف ثابت كوني صغير إلى حد مذهل،

---

[8] الكوزموس: الكون أو العالم ككيان كلي بنظام كامل متناغم. (المترجم)

فإنها في الواقع لها تاريخ طويل. الكوزمولوجيا الإنسانية الجدية في تجسيدها الحديث تقفز متواثبة من أبحاث الباحث البريطاني براندون كارتر في أوائل سبعينيات القرن العشرين، وإن كان فريد هويل عالم الفيزياء الفلكية العظيم قد استخدم حجة إنسانية واحدة محددة لصنع اكتشاف رئيسي في خمسينيات القرن العشرين، سنناقشها في الفصل التالي. أوضح كارتر في اجتماع في بولندا في ١٩٧٣ أن «ما يمكن لنا أن نتوقع ملاحظته لا بد أن يكون مقيدًا بالشرط الضروري من أجل وجودنا كملاحظين»، وما زالت هذه هي أفضل إفادة بليغة موجزة عن المبدأ الإنساني. على أنه منذ زمن طويل يرجع إلى ١٩٠٣ نجد أن ألفريد راسل والاس (المشهور عنه أنه قد اكتشف مستقلًا نظرية «داروين» عن التطور بالانتخاب الطبيعي) يكتب في كتابه «موضع الإنسان في الكون» قائلًا: «الكون الرحيب المعقد مثل ذلك الذي نعرف أنه يوجد من حولنا، ربما يكون مطلوبًا على نحو مطلق ... من أجل إنتاج عالم ينبغي أن يكون مهيأ بدقة بالغة ... من أجل ... تطور الحياة.»

على أنك لست بحاجة إلى أن تنظر إلى الكون بأسره لتصل إلى الشعور بالاستدلال الإنساني. وكمثل فإننا نجد في منظومتنا الشمسية أنه ربما يكون من باب الصدفة الخالصة، وبدون أي مغزى، أنه يوجد أربعة كواكب صخرية (عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ) تدور قريبة من الشمس، وليس ثلاثة أو خمسة منها. لا يوجد أي سبب يجعل تطورًا ينشأ عنه ظهور علماء فلك فوق الأرض قابل للحدوث في وجود ثلاثة كواكب صخرية أخرى. ولكن هناك سببًا رئيسيًّا لأن يحدث تطور يؤدي إلى ظهور علماء الفلك فوق الأرض وليس فوق الكواكب الصخرية الثلاث الأخرى. هناك نوع من «تأثير انتخابي» إنساني ظل يعمل في منظومتنا الشمسية. من بين الجيران الثلاثة من الكواكب — الزهرة، والأرض، والمريخ — الأرض وحدها هي التي قدمت وطنًا ملائمًا لأشكال حياة مثل حياتنا نحن الآن. أشكال الحياة مثل حياتنا نحن تستطيع أن تبقى حية فوق الأرض فقط، ومن ثم فنحن عندما ننظر فيما حولنا لن يكون من المفاجئ أن نجد أن الأرض هي الكوكب الذي نعيش فوقه. عندما «يُشترط» أنه يوجد بمعنى

ما اختيار ما بين أكوان لها خصائص فيزيقية مختلفة، فإن هذا المنطق نفسه يقول إن أشكال الحياة مثلنا نحن هي التي ستوجد لا غير لتلاحظ ما يجري، ولتقيس أشياء مثل الثابت الكوني، في أكوان هي الموطن الملائم لأشكال حياة مثل حياتنا نحن — وهذا أكثر من أن يكون مجرد حشو زائد مكرر، كما تدلل على ذلك الكواكب. بما أننا أحياء، لن تكون هناك مفاجأة، كما تجرى المحاجة، في أن نجد أننا نعيش في كون يوصل إلى الحياة، ولا تكون هناك مفاجأة من أن نجد أن السمك يعيش في الماء.

يرجع الأمر في معظمه إلى ما تفضله أنت شخصيًا بأن تميل إلى هذه الفكرة أو أن تنفر منها، وحتى بالنسبة لمن يميلون إليها ستزداد سعادتهم إذا ثبت في النهاية أن هناك سببًا رئيسيًا في أن كثافة الطاقة المظلمة صغيرة بمثل ما هي عليه. على أن النقطة الجوهرية هي أننا موجودون «فعلًا»، وأننا نعيش في كون مسطح يقرب عمره من ١٤ مليار سنة وحيث الطاقة المظلمة فيه قد بدأت حديثًا تقهر الجاذبية وتزيد من معدل سرعة التمدد. باعتبار أن طبيعة الكون هكذا، كيف تأتى لنا أن نوجد هنا؟ للإجابة عن هذا السؤال، نحتاج أولًا إلى أن نعرف من أي مكان أتت الخامة التي صنعتنا منها، أي كل أنواع المادة الباريونية بخلاف الهيدروجين والهيليوم المنبثقين عن الانفجار الكبير. في إمكاننا الآن أن نتجاهل النظر إلى الكون بصفته العامة وأن نركز على ما جرى في مجرتنا نحن (ومئات المليارات من المجرات المماثلة لها) عندما كان الكون صغير السن.

الفصل السابع

من أين أتت العناصر الكيميائية؟

على الرغم من أن ألفريد راسل والاس، وهو يكتب منذ ما يزيد عن مائة سنة، لم تكن لديه أي فكرة عن المدى الحقيقي لاتساع الكون وتعقده، فإن ملاحظاته حول العلاقة بين الحياة على الأرض والكون بصفة عامة ما زالت يتردد صداها إلى الآن. يبدو في مثال آخر للتفكير الإنساني أن من الممكن تمامًا أن هذا الكون الهائل الحجم الذي يبلغ عمره مليارات السنين، هو ما يلزم «كمسرح» تستطيع أشكال الحياة مثلنا أن تؤدي دورها عليه. حقيقة أننا موجودون تعني أننا حينما نتطلع إلى سماء الليل لا بد أننا سنرى حتمًا كونًا كبير الحجم والسن.

يجرى هذا الاستدلال كما يلي، إذ يبدأ من حقائق تفيد بأن الكون مسطح، ويتمدد، وله ثابت كوني صغير، ويحوي لامتناسقات يسببها تكتل المادة معًا تحت تأثير الجاذبية. كيف يحدث أن تتشكل بعض هذه التكتلات من المادة في نجوم، وكواكب، وبشر؟ هذا الترتيب مهم، لأن الحياة — كما سبق أن أكدت في كتاب آخر («غبار النجوم») — تبدأ بعملية تكوين النجوم. لقد صُنعنا من أنواع شتى من المادة الباريونية، وليس من الهيدروجين والهيليوم فحسب، بل إننا في الحقيقة لم نُصنع من أي هيليوم مطلقًا. كل عنصر في أجسامنا فيما عدا ذرات الهدروجين قد أُنتِج داخل أحد النجوم، وهذا يستغرق وقتًا، وهو وقت يستمر الكون أثناءه في التمدد. ومن ثم فإن حقيقة إننا موجودون تتطلب أن يكون الكون كبير الحجم والسن.

يُعد الفهم الحديث لطريقة إنتاج العناصر الكيميائية داخل النجوم مثالًا نموذجيًّا آخر للقدرات القوية التي تنجم عن الجمع بين ما نعرفه في الفيزياء

بالمقاييس الكبيرة — وهي في هذه الحالة مقاييس النجوم — وبين ما نعرفه في الفيزياء بالمقاييس الصغيرة — وهي في هذه الحالة مقاييس نوى الذرات. في هذه المرة فتحت دراسة فيزياء النجوم — الفيزياء الفلكية — الباب إلى أحد المعالم الرئيسية في فيزياء الكم، وهو عدم اليقين المصاحب لثنائية الموجة-الجسيم.

يرى الفيزيائي النجم من الخارج شيئًا بسيطًا، فهو كرة من مادة خام تتماسك معًا بالجاذبية، وتُمنع من المزيد من التقلص بواسطة الحرارة التي تتولد في قلبه، والتي يترتب عليها ضغط إلى الخارج يوازن الجاذبية. إذا عرفت مدى لمعان أحد النجوم وكتلته، فستجري عملية حسابية بسيطة (هي حقًا على مستوى المدرسة الثانوية) لاستنتاج مدى ما يجب أن تكون عليه سخونة قلب النجم لمنع تقلصه. لا تهم هنا المادة التي صنع منها النجم، أو من أين يستمد الطاقة، بل المهم أنه يجب أن تكون له درجة حرارة داخلية معينة حتى توفر الضغط لمقاومة شد الجاذبية وحتى يسطع لامعًا كما يفعل. الشمس نجم عادي إلى حد بعيد، وقريب منا بالدرجة الكافية لدراسته بشيء من التفصيل، وهكذا فإن الشمس كانت أول نجم يخضع للبحث بهذه الطريقة، على أنه بفضل التحليل الطيفي استطاع علماء الفلك أن يقيسوا أيضًا حرارة النجوم الأخرى، وبفضل الطريقة التي تدور بها النجوم الثنائية أحدها حول الآخر. تمكن علماء الفلك في حالات كثيرة من أن يقيسوا أيضًا كتلتها.

في عشرينيات القرن العشرين تمكن علماء الفيزياء الفلكية من إجراء تلك العمليات الحسابية البسيطة، وحددوا أن الحرارة المركزية لنجم مثل الشمس لا بد أن تكون حوالي ١٥ مليون كلفن. المصدر المعقول الوحيد للطاقة اللازمة للإبقاء على سطوع الشمس هو تحويل الكتلة إلى طاقة بما يتفق مع معادلة أينشتاين ط = ك س^٢^، ولكن من أين يمكن أن تأتي الكتلة؟ في ذلك الوقت كانت تكنولوجيا فيزياء الجسيمات قد ارتقت بالفعل إلى الدرجة الكافية لإجراء قياس لكتل نوى الذرات بشيء من الدقة، وكان من الواضح أن الكتلة يمكن (ولا بد) أن «تُفقد» إذا اندمجت النوى الخفيفة معًا لتصبح نوى أثقل. مثال ذلك أن نواة الهيليوم-٤ تتكون من بروتونين

ونيوترونين، ولها كتلة مقدارها ٤,٠٠٢٦ من الوحدات (بالمقياس الذي تعرّف به كتلة نواة الكربون-١٢ بأنها من ١٢ وحدة كتل ذرية)، ولكن الكتلة الكلية لأربعة بروتونات مفردة هي ٤,٠٣١٣ وحدة كتل ذرية. إذا أمكن حث أربعة بروتونات (أو أربع نوى هيدروجينية) لتتحد معًا لتشكل نواة هيليوم واحدة، فستنطلق كتلة مقدارها ٠,٠٢٨٧ وحدة كتل ذرية في شكل طاقة، بما يزيد بمقدار ضئيل عن ٠,٧ في المائة من الكتلة الكلية للبروتونات الأربعة الأصلية.[1]

إلا أن هناك عقبة ستبرز هنا. إذا أمكن بطريقة ما ضغط أربعة بروتونات لتتقارب معًا بالدرجة الكافية، فإن القوة النووية القوية ستكون القوة المسيطرة وتربطهم معًا بإحكام، مع قذف إلكترونين (العملية المعروفة بأنها اضمحلال بيتا)، لتصنع نواة وحيدة من هيليوم-٤. في الحقيقة، فإن القوة القوية هي التي تبقي هذه النوى متماسكة معًا حتى وإن كانت الشحنة الموجبة فوق كل البروتونات تجعلها تتنافر. إلا أن القوة القوية لها مدى فعل لمسافة قصيرة جدًّا. عندما يقترب بروتونان أحدهما من الآخر، فإن ما يحسان به من تنافر متبادل كنتيجة لشحنة كل منهما الموجبة يصبح تنافرًا قويًّا بما يكفي لتطايرهما متباعدين أحدهما عن الآخر، وذلك في وقت يسبق طويلًا الوقت الذي تجد فيه القوة القوية فرصتها لأن تظهر فعلها، وذلك إلا عندما توجد ظروف متطرفة أقصى التطرف. حتى يصل بروتونان إلى أن يتقاربا معًا بالدرجة الكافية لأن تتولى القوة القوية زمام الأمور وتجعلهما يتلاصقان، مع قذف بوزيترون واحد ليتم تشكيل ديوترون، أو نواة الديوتريوم، حتى يصلا لذلك يكون عليهما أن يتحركا بسرعة شديدة حقًّا، ويعني هذا أن يكونا في بيئة من درجة حرارة وضغط مرتفعين. كما سبق أن رأينا، فإن هذه الظروف كانت موجودة في أول دقائق قليلة من الانفجار الكبير، وإن كان هذا غير معروف في عشرينيات القرن العشرين. ما كان يعرف «فعلًا» عند منتصف هذه العشرينيات هو أنه عند درجة الحرارة

[1] عندما ندقق كل التدقيق، سنضع في الحسبان أيضًا كتل الإلكترونين الناتجين عن تحول اثنين من البروتونات إلى نيوترونين، إلا أن كتلة كل إلكترون هي فقط ٠,٠٥ في المائة من كتلة البروتون، ومن ثم فإن المحاجة تظل صحيحة.

التي تبلغ «فقط» ١٥ مليون درجة لن تكون النوى قادرة على الاندماج بالطريقة المطلوبة لتوفير مصدر الطاقة للشمس والنجوم الأخرى، حسب قوانين الفيزياء المعروفة آنذاك. اكتشاف عدم اليقين الكمومي — الفيزياء الجديدة — هو الذي حل هذه المعضلة.

ينبئنا عدم اليقين الكمومي أن كيانًا مثل البروتون ليس له موضع مضبوط عند نقطة في المكان ولكنه ينبسط منتشرًا بطريقة مضببة. تستطيع بلغة من ثنائية الموجة-الجسيم أن تفكر في هذا الأمر على أنه وجه من الطبيعة الموجية «لأحد الجسيمات». الموجات في جوهرها أشياء تنبسط منتشرة. إذن، فعندما يقترب بروتونان أحدهما من الآخر، يكون من الممكن لموجتيهما أن تأخذا في التداخل حتى وإن كانت الفيزياء القديمة تقول إنهما لم يتلامسا بعد. ما إن تمتزج الموجتان بهذه الطريقة، حتى تستطيع القوة القوية أن تأخذ في العمل وتشد البروتونين في عناق أكثر إحكامًا وتجبرهما على قذف إلكترون (بمساعدة من التفاعل الضعيف). تسمى هذه العملية أحيانًا بأنها «الظاهرة النفقية» لأن التنافر الكهربائي بين جسيمين بشحنة موجبة يعد حاجزًا لا يمكن التغلب عليه حسب الفيزياء الكلاسيكية، ويبدو الأمر وكأن البروتونات تحدث نفقًا خلال الحاجز بمساعدة من عدم اليقين الكمومي (يصدق هذا بالطبع بالنسبة للجسيمات الأخرى). عندما وفد عدم اليقين الكمومي إلى مسرح الأحداث في أواخر عشرينيات القرن العشرين، ثبت في النهاية أنه يوفر بالضبط الفرصة الكافية للبروتونات لأن تنضم معًا في قلب الشمس لتطلق الطاقة اللازمة للإبقاء على الشمس ساطعة.

لعله مما يجدر بالتوضيح هنا مدى تطرف الظروف التي تحدث بتأثيرها هذه التفاعلات النووية، بالمقارنة بظروف الحياة اليومية فوق سطح الأرض. قلب الشمس هو المنطقة التي تحدث فيها التفاعلات النووية لتحول المادة إلى طاقة، ويمتد هذا القلب إلى مسافة تبلغ فقط رُبع البعد من المركز إلى السطح، بما يعني أن القلب يشغل فقط ١,٥ في المائة من حجم النجم. في داخل هذا الحيز، تكون درجة الحرارة أسخن كثيرًا من أن تسمح للإلكترونات بأن تبقى في عناق كهرومغناطيسي مع النوى لتشكل ذرات، وتكون النوى محشودة بكثافة تصل إلى ١٢ ضعف كثافة الرصاص الجامد

فوق الأرض، أو تصل إلى ١٦٠ ضعف كثافة الماء. يبلغ مقدار الضغط في القلب ٣٠٠ «مليار» ضعف الضغط الجوي عند سطح الأرض. بسبب هذه الكثافة العالية، نجد أن حجم منطقة الواحد والنصف في المائة داخل الشمس يحوي بالفعل نصف كتلة الشمس. تصل الحرارة، كما سبق ذكره، إلى ذروة تقرب من ١٥ مليون كلفن (الحرارة عند الحرف الخارجي للقلب تقرب من ١٣ مليون كلفن)، على أن النوى حجمها أصغر جدًّا من الذرات حتى إنها عند هذه الكثافات تسلك بالضبط الطريقة التي تسلك بها ذرات الغاز في ظروف أقل تطرفًا من ذلك، فتتحرك سريعًا وهي ترتد متواثبة إحداها عن الأخرى في اصطدامات متكررة. قلب الشمس فيه تقريب لما يرجح أن يجد فيه الفيزيائيون مثلًا جيدًا لمفهومهم عن الغاز «الأمثل».

هذه الظروف متطرفة بالمعايير البشرية، ولكنها أقل تطرفًا بكثير عن الظروف التي كانت توجد في الانفجار الكبير. الفارق الحاسم هو أن الظروف عند قلب أحد النجوم تظل باقية كما هي ملايين، أو حتى مليارات السنين، بينما ينتهي الانفجار الكبير خلال دقائق قليلة، ولم يكن هناك ببساطة أي وقت كي يجرى التركيب النووي لزمن بالغ الطول. بل حتى في الظروف الموجودة في قلب الشمس، يحدث فقط عند الاصطدامات النادرة جدًّا التي تقع بالمواجهة أن يقترب بروتونان أحدهما من الآخر الاقتراب الكافي لكي تعمل الظاهرة النفقية، وأن يتم تخليق ديوترون بواسطة القوة النووية القوية مضافًا إليها تنويع على عملية اضمحلال بيتا، يتكون هذا الديوترون من بروتون واحد ونيوترون واحد قد ربطا معًا.

استغرق الأمر أكثر من عشرين سنة لاستنباط كل تفاصيل عمليات الاندماج النووي التي تبقي الشمس ساطعة. وكمثل، فإن تفاصيل طريقة تفاعل البروتونات أحدها مع الآخر عندما تصطدم («بمقطعها العرضي») قد قيست في معجلات الجسيمات واستخدمت هذه المقاييس لحساب مدى ما يتكرر به أن ينتج عن هذه الاصطدامات ديوترونات في قلب الشمس. على أننا نستطيع القفز مباشرة إلى نتائج كل هذا الجهد. على الرغم من أن البروتونات تتواثب فيما حولها ويصطدم أحدها بالآخر مرات كثيرة وكثيرة في كل ثانية، فإننا نجد في المتوسط أن البروتون المفرد لا يلتقي ويندمج

ببروتون شريك إلا بعد مليار سنة. ومن ثم، فمع كل مليارين من البروتونات نبدأ بهما، سنجد بعد سنة أن هناك زوجًا واحدًا من البرتونات يقترن فيه أحدهما بالآخر ليكون ديوترونًا.

بمجرد أن يحدث ذلك، نجد في خلال ما يقرب من ثانية واحدة أن بروتونًا ثالثًا يلتصق بالديوترون ليصنع نواة هيليوم-٣. عندما تصطدم بروتونات أخرى بنواة الهيليوم-٣، فإنها ترتد متواثبة لا غير، ويكون هناك عدد لنوى هيليوم-٣ أقل من عدد البروتونات بحيث تصطدم هذه النوى إحداها بالأخرى بتكرار أقل. ولكنها عندما تصطدم بالفعل، تكون نسبيًّا متحمسة للاندماج، وبعد مرور ما يقرب من مليون سنة فقط على نواة هيليوم-٣ وهي تهيم خلال قلب الشمس، سوف تلتقي بنواة أخرى من هيليوم-٣ وتتحد معها لتكوّن نواة هيليوم-٤، مع قذف بروتونين اثنين.

هذه السلسلة المعينة من الأحداث تدعى سلسلة البروتون والبروتون، وعمومًا فإن كل عملية تحويل الهيدروجين إلى هيليوم (بأي طريقة كانت) يشار إليها أحيانًا بأنها احتراق الهيدروجين. النتيجة النهائية بعد ما يزيد قليلًا عن مليار سنة، هي تحويل أربعة بروتونات إلى نواة واحدة لهيليوم-٤ مع انطلاق طاقة.[٢] مع إنتاج كل نواة لهيليوم-٤ بهذه الطريقة، يتم «فقد» مقدار ٠٫٠٤٨ × ١٠^-٢٧ كيلوجرام من الكتلة. على أن هناك مليارات كثيرة من الجسيمات في قلب الشمس، وعددًا بالغ الكثرة من تفاعلات الاندماج تقع في كل ثانية، حتى إن الشمس «تفقد» عمومًا ٤٫٣ مليون طن من الكتلة في كل ثانية، عن طريق تحويل ٦٠٠ مليون طن من الهيدوروجين إلى ما يقل بالكاد عن ٥٩٦ مليون طن من الهيليوم. (كمية الهيدروجين الذي يتحول إلى هيليوم داخل الشمس في كل ثانية هي تقريبًا نفس كمية الهيدروجين في مياه بحيرة ميتشيجان بأمريكا الشمالية). ظلت الشمس تفعل ذلك لما يقرب من ٤٫٥ مليار سنة، وحتى الآن فإنها أطلقت في هذه العملية طاقة مقدارها فحسب أجزاء قليلة من المائة من ١ في المائة من كتلتها الأصلية من الهيدروجين. ينبغي ألا يدهشنا أن هذه النسبة المئوية بالغة الصغر

---

[٢] هناك بعض «سلاسل جانبية» لهذه العملية، تتضمن تفاعلات تختلف قليلًا، كما يحدث عندما تلتقي نواة هيليوم-٣ مع نواة هيليوم-٤، إلا أن هذه التفاعلات تسهم بقدر صغير فقط من الطاقة المنطلقة.

هكذا، حيث إن إنتاج كل نواة لهيليوم-٤ يكون مصحوبًا بانطلاق نسبة ٠,٧ في المائة فقط من كتلة البروتونات الأربعة الأصلية. حتى لو كانت الشمس قد صنعت كليًّا من الهيدروجين (وهو ما لا يحدث)، وتحول كل هذا الهيدروجين إلى هيليوم-٤، فإن الكتلة التي ستفقدها في هذه العملية ستكون فقط ٠,٧ في المائة من كتلتها الأصلية. ما تخبرنا به هذه الأرقام في الحقيقة هو فحسب كيف أن الشمس كبيرة!

السرعة التي يحدث بها هذا كله سرعة تنظم نفسها ذاتيًا. عندما تنكمش الشمس إنكماشًا قليلًا، سيرتفع الضغط والحرارة في قلبها، ويحدث المزيد من الاندماج، ليطلق المزيد من الطاقة. ستؤدي زيادة الحرارة إلى أن يتضخم النجم، بما يخفض الضغط ويبرد الحرارة ثانية إلى درجة أقل. عندما يتمدد النجم سيبرد قلبه، وسيبطئ معدل سرعة إنتاج الطاقة، وينكمش النجم ثانية إلى حجمه المستقر. أما عندما ينفذ وقود الهيدروجين المتاح في القلب (كما سيحدث في الشمس خلال ما يقرب من أربعة مليارات عام)، فإن كل شيء يجب أن يعدَّل للوصول إلى حالة توازن جديد مستقر.

كما أن نوى الهيدروجين (البروتونات) تستطيع أن تندمج لتصنع نوى هيليوم-٤ مع انطلاق الطاقة إلى جانب هذا، فبمثل ذلك تمامًا تستطيع نوى الهيليوم أن تندمج لتصنع نوى عناصر أخرى، وإن كانت الطاقة التي تنطلق في هذه العملية أقل نسبيًا. على أن هذه العمليات من التركيب النووي في النجوم تجرى عند درجات حرارة أعلى مما في سلسلة البروتون-البروتون، ولا يمكن أن تحدث طالما يستمر احتراق الهيدروجين. على الرغم من أن الأمر قد يبدو فيه تناقض ظاهري، فإن احتراق الهيدروجين هو الذي يُبقي بالفعل قلب نجم كالشمس وهو بارد نسبيًا. عندما يُستهلك كل وقود الهيدروجين، يكون أول ما يحدث هو أن ينخفض الضغط داخل القلب، بما يسمح للقلب بالانكماش. يؤدي هذا إلى إطلاق طاقة جذبوية، فيسخن القلب حتى الوصول إلى نقطة يمكن عندها أن تحدث تفاعلات اندماج جديدة. تنطلق الطاقة بواسطة هذه التفاعلات فتؤدي عندها إلى استقرار النجم وهو داخليًا عند درجة حرارة وضغط أعلى يستمران طالما يبقى مصدر الوقود الجديد.

بما أن نواة الهيليوم-٤ هي بالذات تشكيل مستقر من النيوكليونات، فإنها تعمل كوحدة واحدة في الكثير من هذه التفاعلات، وتسمى أحيانًا «بجسيم» ألفا، في المرحلة التالية من التركيب النووي في النجوم يتم بناء عناصر أثقل ويكون ذلك غالبًا بأن تلتصق معًا جسيمات ألفا. بعض النوى ربما تمتص عندها بروتونات أكثر، وبعضها قد يقذف جسيمات ليتم صنع نوى عناصر أخرى أو نظائر، إلا أن ما يحدث عمومًا هو أن العناصر الكبيرة التي تحوي نواها مضاعفات لأربعة نيوكليونات (مثل كربون-١٢ وأكسجين-١٦) تكون بالذات مستقرة وشائعة بالمقارنة مع العناصر الثقيلة الأخرى. (بالنسبة لعالم الفلك تُعد كل العناصر ثقيلة فيما عدا الهيدروجين والهيليوم، علماء الفلك يشيرون أيضًا إلى كل العناصر، فيما عدا الهيدورجين والهيليوم على أنها «معادن»، وفيما يفترض قد يكون ذلك لمجرد رغبتهم في مشاكسة علماء الكيمياء).

لعل القارئ قد خمن هكذا أن الخطوة التالية في عملية الاندماج، ستكون إذن تكوين نوى بريليوم-٨ من أزواج من نوى هيليوم-٤. إلا أن بريليوم-٨ هو الاستثناء الذي يثبت القاعدة. إنه في الحقيقة غير مستقر إلى حد بعيد، وإذا اتفق أن اصطدمت بالفعل نواتان من الهيليوم-٤ بالطريقة المناسبة لا لتصاقهما معًا، فإنهما يفعلان ذلك لزمن من برهة وجيزة جدًا لا غير. يطرح هذا لغزًا جديًا يواجه علماء الفيزياء الفلكية، حيث إنه توجد في الكون كثرة رهيبة من عناصر أثقل من البريليوم، ولا يوجد أي مكان لصنعها إلا في داخل النجوم. كيف يمكن للتركيب النووي في النجوم أن يقفز عبر البريليوم ويصنع النوى الأثقل والأكثر استقرارًا؟ لم يتم حل هذا اللغز إلا في خمسينيات القرن العشرين، عندما طرح فريد هويل رأيًا فيه نفاذ بصيرة أوضح فيه كيف أن كربون-١٢ المستقر يمكن صنعه داخل النجوم من ثلاث نوى للهيليوم-٤، في تفاعل يعرف بعملية ألفا الثلاثية. على الرغم من أن هذا الكتاب يركز على أفكار القرن الحادي والعشرين وليس على التاريخ القديم لخمسينيات القرن العشرين، فإن بصيرة هويل كانت نفاذة بعمق بالغ وعلى علاقة وثيقة بالتفكير الحديث في علم الكون؛ فجعلت الأمر جديرًا باستطراد صغير لتفحص أهميتها. الحقيقة أن فكرة

هويل تشكل أول تطبيق لمنطق الاستدلال بالمبدأ الإنساني يؤدي إلى صنع تنبؤ حول طبيعة العالم الفيزيقي، ولا يزال هذا التطبيق هو الأكثر نجاحًا إلى الآن.

زمن عمر نواة البريليوم-٨ هو فقط ١٠^{-١٩} ثانية، ولكن حتى في هذا الزمن القصير، في الظروف التي تسود في قلب النجم عندما يصل احتراق الهيدروجين إلى نهايته، يبقى هناك وقت لنوى البريليوم الناتجة لأن تصطدم مع جسيم ألفا. المشكلة هي أنه بسبب أن البريليوم-٨ غير مستقر إلى حد بعيد، فإن اصطدامًا كهذا ينبغي أن يفجر النواة بدئًا، ولا يؤدي إلى التصاق جسيمات ألفا الثلاث معًا.

استنتج هويل منطقيًا أنه حيث إن هناك وجود لذرات كربون (ووجودها من وجهة النظر البشرية، ملحوظ ومهم أكثر في الكائنات المؤسسة على الكربون مثلنا نحن) فلا بد أن هناك شيئًا في قوانين الفيزياء يسمح لجسيم ألفا الثالث بالالتصاق على الرغم من عدم استقرار البريليوم-٨. وبكلمات هويل نفسه وقت ذاك «حيث إننا محاطون بالكربون في العالم الطبيعي وأن حياتنا نحن أنفسنا تتأسس على الكربون، فلا بد أن النجوم قد اكتشفت طريقة فعالة جدًا لصنعه، وسأعمل على البحث عنها.» (ميتون، «فريد هويل»). إذا كانت عملية ألفا الثلاثية تقوم فعلًا بأداء المطلوب، فإنها ستؤدي إلى صنع نواة كربون-١٢ ولكن هل يمكن أن يكون هناك بعض شيء خاص بالنسبة لنوع نواة كربون-١٢ الناتجة عن العملية يؤدي إلى منع تحللها في التو؟

يعرف هويل من فيزياء الكم أن نوى الذرات توجد عادة في أدنى حالاتها من الطاقة (ما يسمى بالحالة الأساسية)، ولكنها في الظروف المناسبة تستطيع أن تمتص طاقة كمومية (مثل فوتون أشعة جاما) وتدخل فيما يسمى بحالة الإثارة. وهي بعد ذلك بزمن قصير تبعث فوتون أشعة جاما وتعود للاستقرار ثانية في الحالة الأساسية. في هذا ما يماثل الطريقة التي تستطيع بها إحدى الذرات امتصاص فوتون ضوء، مع وثوب أحد الإلكترونات إلى مستوى طاقة أعلى، ثم تعيد الذرة بعث الضوء بينما يعود الإلكترون للاستقرار ثانية عند مستوى الطاقة الأدنى. يمكن تمثيل ذلك

على نحو جيد بطريقة ذبذبة وتر لإحدى الآلات مثل الكمان أو الجيتار، حيث يمكن أن يتذبذب على النحو الأساسي الذي يصنع نغمته الطبيعية (الأساسية) ولكنه عندما يُنقر بالطريقة المناسبة يتذبب في تناغم، ليصنع نغمة أعلى.

استنتج هويل أن الطريقة الوحيدة التي يمكن بها لثلاثة جسيمات ألفا أن تنضم معًا لتصنع نواة واحدة من كربون-١٢ في الظروف السائدة داخل النجوم موضع الاهتمام هي عندما يكون لنواة الكربون-١٢ رنين طبيعي يناظر (في نطاق نسبة مئوية صغيرة) طاقة نواة بريليوم-٨ في حالتها الأساسية «مضافًا» إليها طاقة جسيم ألفا وافد مع درجة الحرارة المناسبة. سيحدث عندها أن الطاقة الحركية لجسيم ألفا الوافد ستروح كلها في «استثارة» نواة الكربون-١٢، ولن يتخلف منها أي طاقة للتفجير بدئًا. تستطيع بعدها نواة الكربون-١٢ المستثارة أن تشع فوتون أشعة جاما لتستقر ثانية في حالتها الأساسية بالطريقة المعتادة، على أن هذه الحيلة تنجح فقط إذا كانت الطاقة اللازمة لصنع حالة الاستثارة في كربون-١٢، حالة الرنين، هي طاقة أقل بعض الشيء من طاقة جسيم ألفا الوافد. لو كانت أكبر من ذلك ولو حتى بقدر صغير، فإنه لن يكون هناك عندها لدى جسيم ألفا الوافد الطاقة الكافية لأداء المهمة، ولو كانت أقل من اللازم كثيرًا، سيكون هناك طاقة حركية متخلفة تكفي لتفجير النواة.

في أواخر أربعينيات القرن العشرين طرحت بعض التجارب وجود رنين له تقريبًا مقدار الطاقة المناسب، ولكن لم يكن هناك وقتها من يصنع أي علاقة لذلك بالعمليات التي تجرى داخل النجوم. أثار هويل الأمر بعدها بسنوات قليلة مع علماء فيزياء الجسيمات في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وقيل له عندها إن آخر تجارب أجريت تطرح أن تجارب الأبحاث المبكرة كانت خطأ. رفض هويل أن يصدق ذلك، وأثار انزعاج القائمين بالتجارب بأن طلب تكرار قياساتهم مرة أخرى. الواقع أن هويل كان يقول إن حقيقة أننا موجودون تعني أن قوانين الطبيعة «يجب» أن تنص على أن نواة عنصر بعينه، مثل كربون-١٢، في حالة استثارة مع طاقة معينة. في خمسينيات القرن العشرين كان يبدو لمعظم العلماء أن هذه السلسلة من الاستدلال

المنطقي منافية للعقل. إلا أن هذا أمر يمكن اختباره مثلما هو الحال مع كل الأفكار العلمية الجيدة.

طريقة اختبار ذلك هي أن نقيس خصائص الكربون-١٢. التكنولوجيا اللازمة لأداء ذلك كانت موجودة في معمل كيلوج للإشعاع في كاليفورنيا. أدلى هويل بتنبؤ دقيق بأن الكربون-١٢ يجب أن يكون لديه حالة استثارة رنينية مع طاقة تبلغ بالضبط ٧,٦٥ فولت فوق حالته الأساسية، وبشيء من الصعوبة أقنع هويل الباحثين في المعمل بأن يجروا التجارب بحثًا عن هذه الحالة من الاستثارة لكربون-١٢. قاد ويلي فولر الفريق الذي نفذ هذه الاختبارات، وقد أخبرني في وقت لاحق أنه لم يفعل ذلك إلا ليفحم هويل حتى يغلق فمه ويرحل، لم يتوقع فولر قط أن يجد ذلك الرنين. ذُهل أفراد فريق التجربة كلهم عندما ثبت في النهاية أن تنبؤ هويل كان مضبوطًا في نطاق نسبة ٥ في المائة. كربون-١٢ له بالفعل رنين في الموضع المناسب بالضبط لأن يجعل عملية ألفا الثلاثية تجرى بنجاح. «السبب» في أنه ينبغي أن يكون الأمر هكذا لا يزال سرًّا، مثلما لا يزال سرًّا السبب في أن الكون يتمدد بمعدل السرعة المناسب بالضبط لأن يسمح بتكوين النجوم، والكواكب، والبشر، الحل نفسه حسب المبدأ الإنساني — بأن هناك أكوان عديدة موجودة مع كل أنواع قوانين الفيزياء، وأننا لا نوجد إلا في الكون الذي يكون بالضبط مناسبًا لنا — هذا الحل هو أحد الحلول الممكنة للغز. على أن ما يهمنا من وجهة النظر العملية، هو أن التركيب النووي في النجوم يمكن أن يقفز عبر فجوة البريليوم-٨، ومن وقتها فصاعدًا نجد أن بناء العناصر الأثقل داخل النجوم يصبح إلى حد بعيد إقلاعًا في رحلة سهلة. ليس هناك مثل أفضل من هذا عن كيف أنه عندما ينضم علماء الفيزياء الفلكية مع علماء فيزياء الجسيمات فإنهم يمنحوننا فهمًا عميقًا لطبيعة الكون.

ما إن توجد نوى الكربون داخل أحد النجوم، حتى يغدو من السهل نسبيًا صنع العناصر الأثقل، وإن كان ذلك إلى حد معين. يستمر احتراق الهيليوم في قلب النجم، مع وجود قشرة أبرد قليلًا من هيليوم غير المحترق تحيط بالقلب (ووجود هيدروجين في أقصى الطبقات الخارجية من النجم)

ويتواصل ذلك حتى ينفد الوقود. ثم ينكمش القلب مرة أخرى، ليصبح أكثر سخونة مما يجعل من الممكن أن تحدث تفاعلًا تندمج فيه نوى الكربون-١٢ مع جسيمات ألفا لتصنع نوى أكسجين-١٦. يؤدي هذا إلى أن يستقر النجم طالما يبقى وجود الكربون، وعند نفاد الوقود تتكرر عمليات الانكماش، والتسخين، وقدح زناد موجة جديدة من الاندماج. كل خطوة من هذه الخطوات المتتابعة تتطلب بالطبع درجات حرارة أعلى، لأنه كلما زاد عدد البروتونات في نواة الذرة زاد ما لها من شحنة موجبة، ويصبح على جسيم ألفا الوافد (الذي يحمل هو نفسه شحنة موجبة) أن يتحرك أسرع ليحدث النفق خلال الحاجـز ويصـل إلى النواة ويتم بهذه الطريقة إنتاج عناصر مثل نيون-٢٠، ومغنسيوم-٢٤، وسيليكون-٢٨، وربما يغدو للنجم الكبير السن سلسلة من الأغلفة تحيط بقلبه مثل قشور البصلة، وتكون العناصر الأثقل عند المركز والعناصر الأخف أقرب للسطح. تؤكد التجارب التي تستخدم معجلات الجسيمات أنه في هذه الظروف يمكن إنتاج عناصر مثل فلورين-١٩، وصوديوم-٢٣ بكميات معتدلة عندما يحدث تفاعل بين النوى الأكثر انتشارًا التي لها كتل تقبل القسمة على أربعة وبين الجسيمات الموجودة في محيطها، فتمتص البروتون المفرد وتبعث البوزيترون المفرد. أعظم نصر في كل هذا البحث هو أن تنامي فهم هذه التفاعلات النووية هنا فوق الأرض، مجتمعًا مع تنامي فهم علماء الفيزياء الفلكية لما يحدث في النجوم، يؤدي إلى التنبؤ بوجود النسب نفسها من العناصر المختلفة التي تُرصد بالفعل في أطياف الشمس والنجوم الأخرى. يَثبت هذا على نحو رائع مما تنامى عند علماء الفيزياء الفلكية من الفهم التفصيلي لمجموعة مهمة بوجه خاص من التفاعلات النووية.

هناك طريقة ثانية عبر سلسلة البروتون-البروتون، يمكن بها للنجوم الأثقل قليلًا من الشمس التي لها قلوب أسخن قليلًا أن تحرق الهيدروجين لصنع هيليوم، بشرط أن يكون هناك من قبل آثار من الكربون والأكسجين هنا وهناك. تتطلب هذه الطريقة وجود النيتروجين والأكسجين مع الكربون، ولهذا فإنها كثيرًا ما يشار إليها بأنها دورة (CNO)؛ الملمح الخاص لهذه الدورة هي أنه على الرغم من أن كل هذه النوى تساهم في الدورة، فإنه

بمجرد أن تصل الدورة إلى التوازن فإن هذه النوى تبقى غير «مستهلكة»، والنتيجة الخالصة لكل دورة تتم من هذه الدورات هي أن تحول أربع نوى للهيدروجين (أربعة بروتونات) إلى نواة هيليوم-٤ (جسيم ألفا).

تعمل الدورة كما يلي: تأسر نواة كربون-١٢ أحد البروتونات وتصبح نواة للنيتروجين-١٣. نواة النيتروجين-١٣ تلفظ بوزيترونا وتصبح نواة كربون-١٣، ثم تلتقط هذه بروتونًا وتصبح نيتروجين-١٤. تمتص نواة النيتروجين-١٤ بروتونًا لتصبح نواة أكسجين-١٥، تقذف نواة أكسجين-١٥ بوزيترونا لتصبح نيتروجين-١٥، وفي النهاية تمتص نواة نيتروجين-١٥ بروتونًا وتقذف في التو جسيم ألفا، مخلفة نواة كربون-١٢، على استعداد لأن تكرر الدورة.[٣] دُرست كل خطوة من هذه العملية في معامل الجسيمات فوق الأرض، ومن ثم فنحن نعرف بالضبط مدى السرعة التي تجرى بها وتحت أي ظروف تجرى. أدى هذا إلى اكتشافات عميقة لها أهمية كبرى بالنسبة لنا ولكل الحياة فوق الأرض.

أبطأ تفاعل في هذه الدورة هو التفاعل الذي يحول نيتروجين-١٤ إلى أكسجين-١٥. كنتيجة لذلك، فإنه في العمر المبكر لنجم حجمه كبير بما يكفي لقدح زناد هذا النوع من حرق الهيدروجين سنجد أن مقدار الكربون الذي يتحول إلى نيتروجين أكبر كثيرًا من مقدار النيتروجين المتحول إلى أكسجين.[٤] مع تراكم المزيد من النيتروجين، فإنه حتى مع أن كل نواة يكون لديها متسع من الوقت للتفاعل، فإن هناك نوى كثيرة للتفاعل، ومن ثم تتأسس في النهاية حالة توازن. الأمر يشبه نوعًا الطريقة التي يمكنك بها أن تحصل على الكمية نفسها من المياه من صنبور واحد يُفتح واسعًا مثلما تحصل عليها من ثقوب عديدة في جهاز ري بالرش في إحدى الحدائق مربوط إلى الصنبور بخرطوم — إذا كان لديك فقط ثقب واحد ضئيل في جهاز الرش، فلن يكون الجهاز بأي حال فعالًا بالقدر الكافي. يعني هذا أنه بالرغم من

[٣] هناك سلاسل تفاعلات أخرى جانبية أقل أهمية تغذي هذه الدورة، مما يعطي علماء الفلك الفرصة لإشباع ميلهم إلى التورية بأن يشيروا إلى «دورة» ثنائية من CNO، أو حتى دورة ثلاثية، إلا أن هذه أمور لا أهمية لها في نقاشنا هنا.

[٤] ولكن دعنا نتذكر أن الكربون مكون ثانوي في هذا النجم، فالنجم لا يزال في معظمه مصنوعًا من الهيدروجين والهيليوم عند هذه المرحلة من عمره.

أنه لكل دوران للدورة لمرة واحدة تكون النتيجة الخالصة لها تحويل أربع نوى هيدروجين إلى نواة هيليوم واحدة، مع انطلاق طاقة أثناء ذلك، فإنه على طول حياة النجم هناك تأثير جانبي يحول الكربون إلى نيتروجين.

ما السبب في أن هذا له كل هذه الأهمية؟ السبب هو أن النيتروجين هو أحد العناصر الأساسية للحياة (بمعنى الحياة كما نعرفها هنا على الأرض)، ودورة CNO هي الميكانزم «الوحيد» لإنتاج النيتروجين في الكون. هناك طرائق أخرى لإنتاج الكربون والأكسجين، كما سبق أن رأينا، ولكن ليس لصنع النيتروجين. نستطيع أن نقول بثقة مطلقة إن أي شدفة من النيتروجين في جسدنا قد تم صنعها داخل نجوم تشبه الشمس، ولكنها فيما يحتمل أكبر قليلًا في كتلتها عن الشمس، وأن هذا النيتروجين يُصنع بواسطة دورة CNO. بدون دورة «ك ن أ» ما كنا لنوجد هنا. إنه لأمر حقيقي أن الحياة تبدأ بعملية تكوين النجوم.

الحقيقة هي أننا لن نكون موجودين هنا لولا أن هذه العناصر التي تُنتج داخل النجوم تنطلق في الكون متحررة لتشكل المادة الخام للأجيال اللاحقة من النجوم، والكواكب، والبشر. سوف نأتي سريعًا إلى هذا الجزء من القصة. ولكننا أولًا قد تركنا نفس قصة التركيب النووي في النجوم عند السيليكون-٢٨، وقد حان الوقت الآن لأن نلتقط الخيوط لنناقش كيف يتم حتى صنع العناصر الأثقل.

تركنا القصة عند السيليكون-٢٨ لسبب قوي — هناك قبل ذلك إضافة لجسيمات ألفا تتم ببساطة في خطوة بعد الأخرى تجاه النوى الأثقل، بحيث تزيد كتلة النوى على نحو مطرد بأربع وحدات في كل مرة، هذه الإضافة تتوقف هنا. تغدو الأمور معقدة لأن قلب النجم يكون الآن بالغ السخونة (بما يقرب من ٣ مليار كلفن) وبالغ الكثافة (باحتشاد ملايين الجرامات من المادة في كل سنتيمتر مكعب) لدرجة أنه يحدث أحيانًا أن تنسحق النوى الكثيفة بددًا. كمثل لذلك، فإن نواة واحدة من سيليكون-٢٨ قد «تتحلل فوتونيًا» إلى سبع نوى هيليوم-٤. إلا أن هذا الفيض من جسيمات ألفا الإضافية لا يلبث أن يتحد بعدها مع النوى الأخرى من سيليكون-٢٨، وربما يكون ذلك مع امتصاص أكثر من جسيم ألفا واحد

بواسطة نواة واحدة من سيليكون-٢٨، بما يؤدي إلى أن يُصنع في خطوةٍ واحدة كبريت-٣٢، وكلورين-٣٦، وأرجون-٤٠ ونوى أخرى أثقل. أحيانًا يحدث أن جسيمات ألفا التي يتم إطلاقها قد تأسرها كلها نواة واحدة مجاورة لها من سيليكون-٢٨ لتحولها في خطوة واحدة إلى نيكل-٥٦.

على أننا هكذا وصلنا تقريبًا إلى نهاية الخط. النيكل-٥٦ نواة غير مستقرة، وسرعان ما تلفظ بوزيترونًا، لتحول نفسها إلى كوبلت-٥٦، نواة الكوبلت-٥٦ هي نفسها تقذف بوزيترونا آخر، لتثبت في حالة مستقرة كنواة حديد-٥٦. الحقيقة أن نواة الحديد-٥٦ هي أكثر نواة مستقرة. حيث إن ما فيها من نيوكليونات (ستة وعشرين بروتونًا وثلاثين نيوترونًا) ترتبط معًا بإحكام أكثر مما في أي نواة أخرى. يعني هذا الوصول إلى نهاية الطريق، فيما يختص باندماج النوى الخفيفة معًا لصنع عناصر أثقل مع إطلاق طاقة في هذه العملية. الطريقة الوحيدة لصنع عناصر أثقل من الحديد هي «إدخال» طاقة — يجب إجبار النوى على أن تنضم معًا بواسطة عملية ما من الخارج، تعتمد على مصدر كبير للطاقة. مصدر الطاقة الوحيد الذي يستطيع أن يقوم بهذه المهمة هو الجاذبية، على أن الجاذبية ليست حتى بالقوة الكافية لأداء المهمة إلا إذا كان للنجم كتلة أكبر كثيرًا من شمسنا.

هناك نجوم كثيرة جدًّا لا تصل حتى إلى نقطة إنتاج عناصر ثقيلة مثل السليكون، والكبريت، والكلورين، وباقي العناصر وصولًا للحديد. الشمس نجم عادي جدًّا، لا يزال يحرق الهيدروجين إلى هيليوم، وسوف تصل في النهاية إلى أن يغدو قلبها ساخنًا بما يكفي لحرق الهيليوم إلى كربون، وربما مع إنتاج القليل من النيتروجين والأكسجين إلى جانب ذلك في دورة CNO. إلا أنه عندما ينتهي إحراق الهيليوم، فإن نجمًا مثل الشمس لا يستطيع أن يتقلص بما يكفي لأن يسخن في داخله بما يكفي لبدء إحراق الكربون إلى أكسجين. سوف ينكمش هذا النجم على نفسه، وتبرد حرارته، ويصبح في النهاية كرة جامدة من الكربون (أو إذا كنت بنزعة رومانسية، فإنه يصبح بلورة واحدة من الماس) محاطة بطبقة من الهيليوم وأثر من الهيدروجين. سوف يغدو هذا النجم قزمًا أبيض، لا يزيد حجمه عن الأرض، ولكنه ما زال يحوي جزءًا كبيرًا من كتلته الأصلية. ليس هناك إلا ١٠ في المائة من

النجوم كتلتها أكبر من الشمس، إلا أنها لها أهمية كبيرة في تفسير أصل العناصر. حتى يحدث إحراق للكربون يحتاج ذلك إلى نجم له كتلة أكبر تقريبًا من أربعة أمثال كتلة الشمس، وحتى نصنع كل العناصر الثقيلة نحتاج إلى أن نبدأ بنجم كتلته مقدارها على الأقل ثمانية أو عشرة أمثال كتلة الشمس. على أن من المهم أن كل هذه النجوم، حتى تلك الصغيرة مثل الشمس، لا تتمسك بكل المواد التي بدأت بها.

في الفترات المختلفة من عمر النجم، عندما يتقلص قلب النجم ويغدو أسخن — كما يحدث مثلًا عند بدء حرق الهيليوم في نجم كشمسنا — سنجد أن الحرارة الإضافية من القلب تؤدي إلى تمدد الطبقات الخارجية من النجم. ينتج عن ذلك أن ربع كتلة النجم على الأقل (إذا كان النجم قد بدأ وكتلته تماثل كتلة الشمس) تُنفث بالكامل بعيدًا في الفضاء، لتكوّن سحابة متمددة من المادة تنطلق بعيدًا في المجرة. هذه السحب هي من أجمل ما يبدو من الأجرام في الكون، وتعرف باسم السدم الكوكبية، لأنها عندما كان يُنظر إليها بتلسكوبات العهود القديمة، التي كانت لها قدرة ضئيلة نسبيًّا على تجميع الضوء، كانت هذه السحب تبدو وهي تشبه الكواكب إلى حد ما. إلا أن الأجهزة الحديثة توضحها وهي في أشكال ملونة منوعة، بما يذكر بالزهور، والفراشات، وحلقات الضوء المتوهجة، وأشياء أخرى غير ذلك. سلسلة التفاعلات المعقدة التي تنتج نواة الحديد-٥٦ (وهي أكثر تعقدًا من التخطيط البسيط الذي خططناه هنا) تؤدي لا غير إلى أن تنفث بعيدًا طبقات النجم الخارجية، إذا تم بأي حال وصول النجم إلى تلك المرحلة من التركيب النووي. الشمس ستفقد ما لا يزيد عن ثلث كتلتها عبر زمن حياتها. إلا أن النجم الذي يبدأ بكتلة تقرب من ستة أمثال كتلة شمسنا قد يقذف إلى الفضاء مواد تمت معالجتها مقدار كتلتها هو خمسة أمثال كتلة الشمس، وهي مواد موشاة بالعناصر الثقيلة، وتستمر عملية قذف هذه المواد حتى يستقر القلب كقزم أبيض له تقريبًا كتلة شمسنا الآن.

أما إذا كان النجم قد بدأ بكتلة ما زالت أكبر نوعًا — مقدارها من ستة إلى ثمانية أمثال كتلة الشمس — فإن الحسابات تبين أنه لا بد من أن يتمزق بالكامل عند نهاية حياته. سبب ذلك هو أن البقية التي تتخلف عند

نهاية الحياة النشطة لهذا النجم تكون لها كتلة أكبر كثيرًا من أن تسمح للنجم بأن يصبح قزمًا أبيض. تقرب الكتلة الحرجة من ١,٤ كتلة للشمس، وتعرف باسم حد شاندرا سيخار،على اسم أول عالم فلك حسب قيمتها وهو سوبرامانيان شاندرا سيخار. عندما لا يعود النجم مدعوما بعد بالضغط إلى الخارج الذي ينتج عن الاندماج النووي. وعندما يكون لهذا النجم كتلة أكبر من حد شاندرا سيخار فإنه لا بد أن يتقلص بتأثير وزنه هو نفسه. ولا يستطيع أن يشكل قزمًا أبيض مستقرًا. مع تقلص نجم كهذا يصير قلبه أسخن — دعنا نتذكر هنا أن الاندماج النووي يبقي النجم «باردًا» بأن يمنع تقلصه — وتزيد سخونة القلب إلى درجة أن الكربون يمكن أن «يحترق» في تفاعلات مختلفة ليصنع عناصر أثقل، مع إطلاق طاقة في هذه العملية، إلا أن الشد الجذبوي للنجم أصغر من أن يبقي على تماسك الشظايا التي تكونت مما نتج من تفجر.

إلى جانب الإضافة البسيطة لنواة هيليوم-٤ إلى نواة كربون-١٢ لصنع أكسجين-١٦، فإنه عند ارتفاع الكثافة، والضغط، والحرارة الارتفاع الكافي، تستطيع نوى الكربون أن تتفاعل مباشرة إحداها مع الأخرى بطرائق مختلفة، أبسط طريقة هي أن تندمج نواتان من كربون-١٢ وتقذفان جسيم ألفا (الذي يواصل بعدها التفاعل مع نواة أخـرى) ويتخلف من ذلك نواة من نيون-٢٠. كل حدث من هذه يطلق في الواقع طاقة أكثر مما يُطلق عند اندماج ثلاثة جسيمات ألفا لصنع نواة واحدة من كربون-١٢، هذا الحرق المتفجر للكربون يحفز تصاعد اندماج النوى حتى الحديد-٥٦، مع انتثار كل هذه المواد في الفضاء عندما يتفجر النجم. عندما يحدث هذا الانفجار سنجد أن هناك حديدًا كتلته على الأقل نصف كتلة الشمس، وأكسجينا يقرب من ثُمن كتلة الشمس، سيكونان من بين العناصر التي تنتشر عبر المجرة، وانفجار كهذا هو أبسط نوع من السوبرنوفا. لكنه لا يزال مما لا يصنع أي عناصر أثقل من الحديد. حتى يتم ذلك نحتاج أن نبدأ بنجم هو حتى أكبر في كتلته.

النجوم التي تبدأ بكتل تزيد عن ثمانية أو عشرة أمثال كتلة الشمس تنهي حياتها على نحو هو حتى أكثر روعة، وهي مصدر كل العناصر

الأثقل من الحديد، بما في ذلك الذهب، واليورانيوم، والرصاص، والزئبق، والتيتانيوم، والسترونشيوم، والزركونيوم. لا حاجة بنا هنا إلى أن ندخل في كل التفاصيل — خاصة وأني قد سبق أن غطيت هذا الموضوع في كتابي «غبار النجوم» — ما يهمنا الآن هو أن نجمًا كهذا حتى بعد أن يفقد كتلة من سطحه في المراحل المبكرة من حياته، إلا أنه لا يزال لديه كمية لها قدرها من المادة في الطبقات الخارجية منه فوق القلب حيث يحدث هذا النوع من التقلص والانفجار. والقلب نفسه لا يزال كبيرًا بالقدر الكافي بحيث يظل له شد جذبوي قوي بما يكفي لأن يظل القلب متماسكًا معًا عندما يتقلص بالفعل، ويطلق طاقة جذبوية. عندما ينتهي الاحتراق النووي في قلب هذا النجم ولا يستطيع بعد أن يدعم ثقل النجم، فستكون للقلب كتلة أكبر من حد شاندرا سيخار، فيتقلص، ويقدح زناد انطلاق متفجر للطاقة بدون أن يتمزق تمزقًا كاملًا.

بالنسبة لطبقات النجم الخارجية، التي تحوي مواد كتلتها عدة أمثال كلتلة الشمس، سيكون الحال وكأن الأرضية قد سحبت بعيدًا من تحتها، مخلفة ما يكاد يكون هوة بلا قرار. طبقات النجم الخارجية — كل هذه المواد بكتلة من عدة أمثال الشمس — ستأخذ في التهاوي إلى الداخل، لتلقى لا غير موجة التفجر من انفجار القلب وهي تتجه خارجًا. تؤدي موجة التفجر إلى ضغط وتسخين مواد الجزء الخارجي من النجم في موجة صدمة، حيث تكون الظروف متطرفة إلى أقصى درجة حتى إن النيوترونات (التي انطلقت من تفاعلات تمزق بعض النوى) تُجبر على الاندماج مع نوى ثقيلة، لتبني العناصر الأثقل من الحديد. في الحقيقة، نجد أن بعض هذه العناصر الأثقل يكون قد تم تركيبها من قبل في الظروف المتطرفة لتقلص القلب نفسه، الذي يعتمد في النهاية على الطاقة الجذبوية التي يطلقها التقلص حتى توفر الضغط الذي يجبر النيوكليونات على أن تنضم معًا، وتنتهي المهمة في موجة الصدمة.

تتعزز الصدمة أيضًا بفيض النيوترونات التي تنطلق نتيجة الأحداث التي تجري في القلب — الظروف في الصدمة تكون فيها كثافة متطرفة حتى إن جسيمات النيوترينو تتوقف فيها، وتساعد على أن تدفع بعيدًا

طبقات النجم الأبعد إلى الخارج. إلا أنه لا يمكن إنتاج العناصر الثقيلة جدًّا إلا بكميات صغيرة نسبيًّا، لأن الظروف التي يمكن فيها إنتاجها لا تستمر بأي حال زمنًا طويلًا. إجمالي كتلة كل العناصر الأثقل من الحديد عندما تجمع معًا تساوي فقط ١ في المائة من إجمالي كتلة كل العناصر من الليثيوم إلى الحديد — وإجمالي كتلة «كل المعادن» يقل عن ٢ في المائة من كتلة الهيدروجين والهيليوم الموجودين هنا وهناك. التأثير النهائي للسوبرنوفا هو أن التفجر في قلب النجم المحتضر يدفع بعيدًا إلى الفضاء كتلة من المادة تساوي عشرة أمثال أو أكثر لكتلة الشمس. في هذه المرة يكون الحديد قليلًا جدًّا في سحابة المادة المتمددة، وذلك لأنه كله يتخلف إلى الوراء في القلب؛ إلا أنه يمكن أن يوجد أكسجين في المادة المقذوفة بكتلة تساوي كتلة شمس واحدة أو كتلتين للشمس، وذلك إلى جانب تلك الآثار من العناصر الثقيلة جدًّا وغير ذلك من الشدف والقطع.

هذه النظرة العامة الموجزة لما نعرفه — أو لما نعتقد أننا نعرفه — حول طريقة صنع العناصر الكيميائية، قد تعطي الانطباع بأن كل شيء قد تحدد وثبت بالتجربة. يصدق هذا حتى حد معين — الخطوط الخارجية العريضة واضحة حقًّا. إلا أن هذه الأمور لا تزال تُبحث، ولا أود للقارئ أن ينطلق بتفكيره بعيدًا ويعتقد أنه لم يبق هناك مجال بعد لأي شيء يُكتشف فيما يتعلق بأصل العناصر. حتى نفهم هذه العمليات فهمًا صحيحًا سيلزم أن نفهم فهمًا كاملًا «كل» التفاعلات النووية المتضمنة فيها — وهذا فهم لا يمكن أن يتأتى إلا من دراسة سلوك النوى في المعمل. هذه مهمة عسيرة، لسببين معًا، هما الأعداد الكبيرة للتفاعلات المتضمنة، وكذلك العمر القصير جدًّا للكثير من النوى التي تشارك في هذه التفاعلات. هناك ١١٦ عنصرًا معروفًا توجد فوق الأرض تأتي بما يقرب مجموعه من ٣٠٠ نوع من الأنواع الطبيعية (٣٠٠ من النظائر). على أن النظرية تطرح أن ما يقرب من «ستة آلاف» نظير يمكن من حيث المبدأ أن تكون موجودة، وبعضها عمره قصير جدًّا، أي واحد من هذه النظائر يمكن أن يشارك في تفاعلات داخل النجوم، إلا أنه ما زال علينا أن نكتشف ما يزيد عن نصفها في تجارب المعجلات.

تتواصل في المعامل في كل أرجاء العالم تجارب من هذا النوع تبحث عن نظائر «جديدة»، وتقيس خصائصها والطريقة التي تتفاعل بها مع

النوى الأخرى، هناك مثلًا مشروع مكرس لذلك في جامعة ولاية ميتشيجان، خطط فيه لبناء معجل للنظائر النادرة في العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين بتكلفة مليار دولار. في الواقع إن فهمنا لأصل العناصر لا يزال إلى حد بعيد في مرحلة التأسيس، وفي إمكاننا أن نتوقع أنه في غضون السنوات العشر أو العشرين التالية سيحدث تقدم حقيقي في فهمنا لما يجري بالضبط داخل النجوم والسوبرنوفات، والطريقة التي يتم بها إنتاج العناصر الكيميائية التي نتكوّن نحن منها، والسبب في أنها موجودة في الكون بالنسبة المضبوطة التي نرصدها. على أن العناصر الثقيلة ليست المنتجات الجانبية الوحيدة لانفجارات السوبرنوفات.

نجد في النوع الثاني من السوبرنوفا (المعروف بالنوع II؛ والنوع الأبسط هو النوع I)، أن القلب نفسه يتخلف عند موقع الانفجار. كرة المادة المكونة للقلب فيها على وجه التأكيد كتلة أكبر من حد شاندرا سيخار، وإذا كان مقدارها أقل من حوالي ثلاث كتل شمسية، فلا يمكن أن يكون لها إلا مستقر نهائي واحد. سوف تستقر ككرة من النيوترونات (هي في جوهرها نواة «ذرية» واحدة ضخمة) كتلتها أكبر من شمس قد ضُرت في كرة عرضها يقرب من ١٠ كيلومترات. تعين وجود نجوم كثيرة من هذه بواسطة ما تبعثه من تشوش بأشعة الراديو، وهي تعرف باسم النابضات، وغالبًا ما توجد، كما قد يتوقع القارئ، في قلوب سحب متمددة مصنوعة من البقايا التي تختلف عن انفجارات السوبرنوفا. لديَّ هوى للنابضات، ذلك أن أول بحث مهم أجريته كطالب للدكتوراه كان لتوضيح أن النابضات لا يمكن أن تكون أقزامًا بيضاء، ومن ثم فبعملية من الاستبعاد، لا بد أن تكون نجوم نيوترون. أما إذا كان للقلب كتلة تزيد عما يقرب من ثلاث كتل شمسية، فإنه ما من سبيل إلى أن يستطيع القلب أن يتماسك ضد قوة شده الجذبوي هو نفسه، وهكذا يتقلص تمامًا تجاه نقطة واحدة (مفردة تكون صورة مرآة لمفردة مولد الكون)، وينغلق على نفسه منعزلًا عن العالم الخارجي إذ يصبح مجاله الجذبوي بالغ القوة حتى إنه لا يسمح بإفلات أي شيء ولا حتى الضوء.

مفردة الثقب الأسود هذه تحيط بها الأسئلة نفسها التي تتعلق بمفردة مولد الكون. هل يحدث حقًا أن كل شيء يتقلص إلى نقطة حجمها صفر،

أو أن هناك خاصية للمكان والزمان (كالأغشية؟) تمنع وقوع ذلك؟ لا أحد يعرف الإجابة، ذلك لأننا حسب التعريف لا نستطيع أن نرى داخل الثقب الأسود، إلا أن الأفكار نفسها التي تؤدي إلى فهم جديد لمولد المكان والزمان في الانفجار الكبير ستؤدي أيضًا إلى فهم أفضل «لموت» المكان والزمان في هذه الظروف. الثقوب السوداء تُربط غالبًا بالموت والدمار في الحكايات الشعبية والروايات، وتُصوَّر على أنها الظاهرة النهائية ليوم الحساب، فتطوف بالمجرة وتبتلع كل ما تلقاه، على أنه جدير بالذكر أن العمليات نفسها التي تصنع الثقوب السوداء هي أيضًا التي تبذر في الكون العناصر الكيميائية اللازمة للحياة، فوجودنا يرتبط ارتباطًا وثيقًا بوجود الثقوب السوداء.

على الرغم من أن هناك أمرًا أوضحناه من قبل، إلا أنه يجدر ذكره الآن كملاحظة جانبية صغيرة، وهو مدى السرعة التي تجرى بها العمليات التي وصفناها في التو في النجوم ذات الكتلة الكبيرة. كلما كان النجم أكبر كتلة يكون عليه أن يحرق وقوده النووي بعنف أشد حتى يحتفظ بتماسكه إزاء الشد الجذبوي إلى الداخل. ومع تقدم كل خطوة في سلسلة الاندماج — ابتداء من حرق الهيدروجين حتى حرق الهيليوم ثم الاحتراق البسيط للكربون وهلم جرًا — نجد أن الطاقة التي تنطلق في كل تفاعل تصير أقل، ومن ثم فإن الوقود يظل باقيًا زمنًا أقصر. شمسنا عمرها ٤,٥ مليار سنة ولا تزال في منتصف الطريق لا غير من زمن عمرها كنجم يحرق الهيدروجين. أما في النجوم التي تبدأ ومقدار كتلتها سبعة عشر أو ثمانية عشر مثل كتلة الشمس، فإن احتراق الهيدروجين يظل باقيًا ملايين قليلة فقط من السنين، ويبقى احتراق الهيليوم مدة تقرب من مليون واحد من الأعوام، ويظل احتراق الكربون باقيًا اثني عشر ألف سنة لا غير، ويبقى حرق النيون والأكسجين إلى ما يقرب من عشر سنوات، أما اندماج السيليكون فيبقى فحسب أيامًا قليلة. على أن أحدث التطورات في فهمنا لأصول العناصر الكيميائية قد أتت لنا من الطرف المضاد من المقياس — من النجوم الأصغر من الشمس، التي لها عمر هائل حتى إنها لا تزال توجد الآن هنا وهناك وإن كانت قد تكوّنت عندما كان الكون صغير السن.

حتى الآن، فإن كل ما ذكرناه للقارئ عن التركيب النووي في النجوم يشير إلى أنواع من النجوم نراها الآن بوفرة في مجرة درب التبانة. أصبحت

كل هذه النجوم ثرية بعناصر أثقل من الهيليوم، ومن ثم فإنها لا يمكن أن تكون قد صنعت من المادة الباريوينة الأساسية التي انبثقت من الانفجار الكبير. لا بد أنه كان هناك على الأقل جيل واحد من النجوم «الأصلية»، التي أنتجت مثلًا الكربون الذي يساهم في دورة CNO في النجوم الأثقل قليلًا من شمسنا الآن. النجوم الشائعة في درب التبانة والمجرات المماثلة تأتي في عائلتين أساسيتين، تعرف باسم الفصائل Population. نجوم الفصيلة I نجوم تشبه شمسنا، وتكون غالبًا في قرص المجرة، وتحوي أكبر نسبة من العناصر الثقيلة. يتم إنتاج هذه النجوم من المواد التي عولجت في أجيال سابقة عديدة من النجوم، وبما أن سحب مادة ما بين النجوم التي تكونت منها هذه النجوم تكون نسبيًّا ثرية بالعناصر الثقيلة، فإن هذه النجوم تكون لهذا السبب النجوم المرجحة أكثر لأن تصاحبها الكواكب والحياة (الأمر الذي سنناقشه بتفصيل أكثر في الفصل التالي). فصيلة النجوم الثانية، واسمها الفصيلة II، توجد أساسًا في حالة كروية تحيط بقرص درب التبانة والمجرات المماثلة، وهي نجوم أكبر سنًّا تكوّنت عندما كان الكون أصغر سنًّا وعندما كان هناك مقدار أقل من المادة التي عولجت داخل النجوم السابقة، ولهذا السبب فإن نجوم هذه الفصيلة أقل ثراء بالعناصر الثقيلة عن نجوم الفصيلة I. نجد هنا أن الفرص قليلة جدًّا للعثور على كوكب صخري مشابه للأرض يصاحب نجمًا من الفصيلة II. على أن دراسات تحليل الطيف تبين أن الطبقات الخارجية حتى في هذه النجوم، وهي المناطق الأبرد التي لم يجر فيها تركيب نووي، تحوي مع ذلك آثارًا لعناصر ثقيلة، ومن ثم فإن هذه النجوم ليست أول ما تشكل من النجوم.

مع الامتدد المنطقي لنظام التسمية الذي أعطانا اسم الفصيلة I والفصيلة II، سيشار لأول نجوم الكون التي صنعت فقط من الهيدروجين والهيليوم على أن لها اسم الفصيلة III، حتى وإن كانت لم تتم بعد رؤيتها. لا بد أن هذه النجوم كانت موجودة لتصنع آثار العناصر الثقيلة التي نراها حتى في نجوم الفصيلة II، وأنها هي التي بدأت العملية التي تؤدي في النهاية إلى تكوين نجوم مثل الشمس، وكواكب مثل الأرض، وبشر مثلنا نحن. على أن صنع نجوم من الهيدروجين والهيليوم وحدهما فيه صعوبة أكبر كثيرًا من

صنع نجوم من سحب الهيدروجين والهيليوم الموشاة بآثار من العناصر الثقيلة. المشكلة هي أنه مع تقلص سحابة الغاز بتأثير ما فيها من شد جذبوي، تصبح السحابة ساخنة في الداخل، وتنحو هذه الحرارة إلى أن تنفث السحابة متباعدة قبل أن تتمكن من أن تنضغط مندمجة بالقدر الكافي لتكوين نجم.

على أنه عندما توجد آثار من مواد مثل الكربون والأكسجين هنا وهناك، فإنه يمكن تكوين جزيئات مركبات مثل أول أكسيد الكربون وبخار الماء. تسخن هذه الجزيئات مع سائر المواد عند تقلص سحابة الغاز، إلا أنها تُعد عوامل جيدة جدًا في إشعاع الحرارة بعيدًا في شكل طاقة أشعة تحت الحمراء. يتيح هذا للسحابة أن تشع الحرارة الزائدة بعيدًا وأن تواصل التقلص حتى تشكل نجومًا مثل الشمس. إلا أنه بدون وجود هذه الذرات والجزيئات، لا يمكن أن يحدث التقلص إلا إذا كان للسحابة كتلة كبيرة، مقدارها يساوي على الأقل عشرات عديدة من كتلة الشمس. عندما تكون السحابة كبيرة هكذا، فإنها تتقلص سريعًا بتأثير ما لها من وزن، لتنتج درجات الحرارة اللازمة للاندماج النووي في منطقتها الداخلية وللتفجر كسوبرنوفا في انفجار يمزق النجم تمامًا ويبعثر العناصر الثقيلة في وسط ما بين النجوم. نوبات احتضار هذه النجوم ينتج عنها تفجرات يبلغ من ضخامتها أنها لا تزال قابلة لأن نكشف عنها الآن كتفجرات لأشعة جاما تأتي من حرف الكون المرصود — أقصى هذه التفجرات بعدًا مما اكتشف حتى الآن يقدر بأنه يأتي من إزاحة حمراء مقدارها ٦,٣، بما يناظر الوقت الذي كان عمر الكون فيه أقل من مليار سنة.

حتى وقت قريب جدًا، كان يبدو أن كل نجوم الفصيلة الأصلية III لها فيما يحتمل كتل تزيد بما له قدره عن مائة شعف كتلة الشمس وأنها تمر بهذه الدورة في زمن يقل كثيرًا عن المليون سنة. الأمر هكذا يصلح جيدًا لصنع العناصر الثقيلة التي نراها في نجوم الفصيلة II، كما يصلح جيدًا لإنتاج تفجرات أشعة جاما، ولكنه أمر سيئ بالنسبة لما يتوقعه علماء الفلك عندما يحاولون العثور على نجوم الفصيلة III التي بقيت موجودة منذ العهد التالي مباشرة لإعادة الاتحاد. النجوم الصغيرة هي وحدها التي

تحرق وقودها بمعدل يطّرد بما يكفي لأن تبقى هذه النجوم موجودة منذ ذلك الوقت، والمعرفة المتفق عليها تنبئنا بأنه لم تكن هناك أي نجوم صغيرة تتشكل في ذلك العهد.

إلا أن هذه ليست أول مرة يثبت فيها خطأ المعرفة المتفق عليها. في السنوات المبكرة من القرن الحادي والعشرين أمكن التعرف في مجرتنا على نجوم عديدة صغيرة شاحبة تحوي القليل جدًّا من المعادن. وهذه ليست تمامًا بنجوم خالصة من الفصيلة III، ولكنها تبدو بالفعل كبقايا «حفرية» من فجر الزمان. وجود هذه النجوم قد ساعد علماء الفلك بالفعل على أن يستنتجوا ما يكون عليه حقًّا نوع النجوم السلف من الفصيلة III، ويبدو من المرجح أن العلماء سيصلون إلى تبصرات أبعد بشأن الطريقة التي بدأ بها تكوين هذه النجوم مع إجراء المزيد من الأبحاث عليها.

أتت الاكتشافات الجديدة نتيجة مسح منطقة كبيرة من السماء الجنوبية، أُجري عبر فترة تقدر بعشر سنوات بواسطة أفراد فريق دولي من علماء الفلك استخدموا أفضل التلسكوبات الحديثة — وذلك في مثل من نمط أصيل للطريقة التي يعتمد بها التقدم العلمي الآن على إسهامات كبيرة تستخدم أجهزة تكنولوجيا راقية غالية بدلًا من أسلوب العالم العبقري المنعزل الذي يبحث وحده في أحد المعامل.[5] النجوم الشاحبة التي كشف عنها هذا المسح تكاد تتكون كليًّا من الهيدروجين والهيليوم، وفيها نسبة من «المعادن» الموجودة في الشمس تقل عن جزء من المائتي ألف مما في الشمس. في هذا الحالة نجد أن مصطلح «المعادن» في محله حقًّا بوصفه بديلًا، حيث إن هذه النجوم تكاد في الحقيقة تخلو تمامًا من الحديد ولكنها تحوي بالفعل آثارًا بين الكربون والنيتروجين. العمر المستنتج لهذه الأجرام يزيد عن ١٣ مليار سنة، وهذا يعني أنها تكونت خلال مليار سنة من الانفجار الكبير وأنها توفر لنا إشارات مباشرة عن طبيعة الكون في ذلك الوقت. على أن هذه نجوم في مجرتنا نحن، لا يزيد بعدها عن آلاف قليلة من السنين الضوئية، وتوفر

[5] كان المسح يهدف أساسًا إلى العثور على الكوازارات، وكان اكتشاف النجوم الشاحبة بمثابة مكافأة إضافية، وفي هذا ما يلقي ضوءًا كاشفًا على إحدى مزايا هذه المشروعات الكبيرة — هذه الميزة هي حقيقة أن هذه المشروعات تجمع مقدارًا هائلًا من البيانات التي يمكن استخدامها بطرائق كثيرة مختلفة.

بصيرة نافذة للظروف التي لا يمكن أن نراها بدون ذلك إلا عند إزاحات حمراء كبيرة إلى حدود قصوى، وذلك بالاستفادة من النظر إلى الوراء في الزمن.

المفاجأة الأولى هي أن نجومًا صغيرة هكذا (تزن ما يقرب من ٨٠ في المائة من كتلة شمسنا) يمكن أن تتكون وبها أثر صغير هكذا من الكربون والعناصر الثقيلة الأخرى لتوفر ميكانزم التبريد بالإشعاع تحت الأحمر الذي يلزم لتتقلص السحب التي تتشكل منها هذه النجوم (انظر الفصل الثامن). اللغز الآخر هو من أين يمكن أن تأتي آثار الكربون والنيتروجين، بدون أي إنتاج للحديد بواسطة نجوم الفصيلة III الأصلية. أفضل ما ظهر حتى الآن كحل لهذا اللغز أتى على يد باحثين اثنين في جامعة طوكيو، أجريا عمليات حسابية تفصيلية لدورة حياة نجوم الفصيلة III التي تبدأ بكتل في مدى من ٢٠ إلى ١٣٠ ضعف كتلة الشمس. وجد هذان الباحثان أن هناك توافقًا جيدًا بوجه خاص مع درجات وفرة العناصر التي تُرى في النجوم الكبيرة السن الفقيرة للغاية في المعادن إذا كان للنجوم السلف كتلة تقرب من خمسة وعشرين شعفًا للشمس، إلا أن درجات وفرة العناصر المرصودة لا يمكن أن تتوافق مع النجوم السلف التي لها كتلة في مدى من ١٣٠ إلى ٣٠٠ مثل لكتلة شمسنا.

الملمح المفتاح في دورة حياة نجوم الفصيلة III التي لها كتلة مقدارها عشرات قليلة من كتلة الشمس هي أن هذه النجوم لا تتمزق بالكامل عند نهاية حياتها. على الرغم من أنها تنفجر بالفعل كسوبرنوفات النوع II، وتقذف إلى الفضاء الطبقات الخارجية الغنية بالكربون والنيتروجين، إلا أن الانفجار ليس بالعنف الكافي لكي يمزق القلب الحديدي للنجم. بدلًا من ذلك فإن مادة القلب الغنية بالحديد وعناصر ثقيلة أخرى تتهاوى ثانية على نفسها لتصنع بقية للنجم لها كتلة من ثلاثة إلى عشرة أمثال كتلة الشمس. هذه كتلة أعلى من حد استقرار نجم النيوترون، ومن ثم فإن هذه البقية لا بد أن تكون ثقبًا أسود. سنجد على نحو حاسم أن هذا ليس مجرد أمر من تنظير ونمذجة بالكمبيوتر لحياة النجم؛ فهناك فئة معروفة من السوبرنوفا من نوع II تسمى «السوبرنوفات الشاحبة»، نجد أن ما يرصد من سلوكها يتفق على نحو وثيق مع تنبؤات محاكيات الكمبيوتر.

هذا يجعل في ذلك النموذج جانبين جذابين. فهو يعطي بالضبط ذلك النوع من إثراء الوسط البينجمي اللازم لتفسير درجة توافر العناصر في النجوم البالغة الفقر في المعادن، كما أنه أيضًا يوفر لنا الثقوب السوداء الأولى، وهي كما سبق أن رأينا، لها أهميتها هي نفسها في حث النجوم على أن تحتشد معًا في عناقيد بينما الكون يتمدد. لعله ستكون هناك أعداد وافرة من هذه الثقوب السوداء في الكون المبكر، من الممكن أن تندمج معًا وتتنامى لتصبح أجرامًا فائقة الكتلة هي التي نكتشفها الآن في مركز المجرات.

هكذا إذن نستطيع أن نتابع مسار أصل العناصر الكيميائية بطول الطريق في الماضي إلى تكوين أول النجوم، في وقت يلي بزمن قصير وقت إعادة الاتحاد. تاريخ تكوين النجم مكتوب هو نفسه في تركيب النجوم، حيث نجد أن النجوم الأكبر سنًا تحوي أصغر كميات من العناصر الثقيلة بينما النجوم الأصغر سنًا تحوي أغنى خليط من العناصر. تبدأ القصة بمزيج الهيدروجين والهيليوم، مضافًا إليه آثار من الديتريوم والليثيوم، انبثقت من الانفجار الكبير. سيطر على ما تلا ذلك من ملايين قليلة من السنين نجوم لها كتلة من عشرات قليلة من مثل كتلة الشمس، وزمن حياتها أقل من المليون سنة. وفرت هذه النجوم المادة الخام للجيل التالي من النجوم، وأصغر نجوم هذا الجيل التالي بقيت موجودة حتى الآن كنجوم بالغة الفقر في المعادن. إلا أن النجوم الأكبر في الجيل التالي التي ربما تكون كتلتها من ثمانية إلى عشرة أمثال كتلة شمسنا، وتدوم حياتها مدة تصل فقط إلى عشرات الملايين من السنين، هذه النجوم قد سيطرت على المشهد مدة تقع بين ٣٠ مليونًا إلى ١٠٠ مليون سنة بعد الانفجار الكبير، وهي تعمل في إنشاء العناصر الثقيلة مثل الباريوم واليوروبيوم، وتبعثرها خلال وسط ما بين النجوم عندما تتحول إلى سوبرنوفا عند نهاية حياتها. المواد الثرية التي يوفرها هذا الجيل من النجوم تتيح تشكيل عدد وافر من نجوم كتلتها مقدارها فقط ثلاثة إلى سبعة أمثال كتلة الشمس، وهذه النجوم هي التي تبدأ في أن تنتج وتوزع عبر الفضاء مزيج العناصر الثقيلة من النوع الذي نراه الآن في الشمس وغيرها من نجوم جيلها.

نتيجة أن النجوم الأصغر تعيش زمنًا أطول، فإن العهود التي هيمنت عليها هذه النجوم امتدت منذ زمن يقرب من مائة مليون سنة بعد الانفجار

الكبير حتى مليار سنة بعد هذا الانفجار. لم يحدث إلا بعد أن أدى هذا العهد إلى زيادة ثراء المادة الموجودة بين النجوم، أن أمكن تشكيل ما يلي من النجوم من النوع الذي ينشر الحديد عبر الفضاء بالطريقة التي وصفناها فيما سبق. إلا أنه بمرور ثلاثة أو أربعة مليارات سنة بعد الانفجار الكبير، أي منذ عشرة مليارات سنة تقريبًا، نجد أن المجرات مثل درب التبانة موجودة بالفعل، بنجومها ذات الفصيلتين المتميزتين، ومع عملية تشكيل للنجوم تجرى في قرص درب التبانة على نحو يماثل تقريبًا ما يحدث الآن. مع مرور الوقت يستمر في الوسط ما بين النجوم وفي الأجيال اللاحقة من النجوم أن يتزايد إثراؤها بالعناصر الثقيلة، إلا أن العملية تظل تتواصل أساسًا بالطريقة نفسها طول ذلك الوقت، في حالة شبه مستقرة. هكذا نستطيع بإزاء هذه الخلفية أن نلقي نظرة على الطريقة التي تشكلت بها الشمس هي وعائلتها من الكواكب، أي المنظومة الشمسية، عندما كان عمر مجرة درب التبانة يقرب من منتصف عمرها حاليًّا.

الفصل الثامن

من أين أتت المنظومة الشمسية؟

كان القدماء يعتقدون أن النجوم خالدة ولا يعتريها تغير. من وجهة النظر الحديثة، حتى إذا كنت تعرف أن للكون بداية، فإنك قد تخمن أن النجوم كلها قد ولدت بعد زمن قصير من البداية، وأنها ظلت باقية من وقتها. على أن الأمر كما شرحنا فيما سبق، هو أننا نعرف أن هناك أجيالًا عديدة من النجوم وُجدت منذ الانفجار الكبير، ونعرف أيضًا أن النجوم لا تزال تولد الآن في مجرة درب التبانة وغيرها من المجرات، وأننا عن طريق دراسة مواقع ولادة النجوم نستطيع أن نبدأ في فهم الطريقة التي تكونت بها الشمس وعائلتها من الكواكب. أحدثت هذه الدراسات تغييرًا كبيرًا في أفكارنا عن مولد النجوم خلال السنوات القليلة الماضية، إذ إن تطور التكنولوجيا وظهور أجهزة الرصد الجديدة قد مكنا علماء الفلك من فحص قلوب سحب الغبار والغاز التي تتكون فيها النجوم.

الارتباط بين النجوم الناشئة وسحب الغاز والغبار في الفضاء هو أول ما أعطى إشارة إلى المكان الذي تأتي منه النجوم والكواكب. يعتمد عمر النجم على السرعة التي يحرق بها وقوده (أو ما يعني شدة توهجه) وعلى مقدار ما لديه من وقود يحرقه. النجوم الأكبر كتلة لديها وقود أكثر لتحرقه، إلا أن عليها أن تحرقه بسرعة أكبر حتى تحتفظ بتماسكها هي نفسها ضد شد الجاذبية. ومن ثم فإن أقصر النجوم عمرًا تجمع بين كبر الحجم وشدة التوهج. ولما كان عمر هذه النجوم قصيرًا هكذا، فإننا عندما نراها نعرف أننا نشاهدها وهي قريبة من الموقع الذي ولدت فيه، وأكبر نجوم مجرتنا وأشدها توهجًا ترتبط كلها بسحب من الغبار والغاز. أحد أقرب

هذه التكتلات من المادة تقع في كوكبة الجوزاء Orion اللامعة، وسديم الجوزاء المشهور ليس إلا جزءًا من منطقة أكبر من سحب الغاز والغبار، وغير ذلك من الأجرام الفلكية المثيرة للاهتمام، وتعرف هذه السحب أحيانًا بأنها «مركّب الغاز والغبار». بعض أشهر الصور التي التقطها تلسكوب هابل الفضائي تبين نجومًا ناشئة مغمورة في سحب مركّب الجوزاء، حيث السحب نفسها يطغى عليها إشعاع النجوم.

علماء الفلك واثقون الآن من أنهم يفهمون على الأقل الخطوط العريضة لعمليات تكوين النجوم، وأحد أسباب ذلك هو أن مناطق تكوُّن النجوم مثل منطقة الجوزاء بها آلاف النجوم الناشئة التي تصلح للدراسة. إحدى هذه المنظومات التي خضعت لدراسة موسعة هي المجموعة العنقودية لسديم الجوزاء، وهي تبعد عنا بما يقرب من ٤٥٠ فرسخًا نجميًّا (ما يقرب من ١٥٠٠ سنة ضوئية). عندما ننظر إلى الوراء في الزمن منذ ١٥٠٠ سنة، فإن هذا يعني أن الضوء الذي يصلنا الآن من هذه المجموعة العنقودية قد بدأ رحلته في وقت يقرب من الوقت الذي أخذ فيه محمد يلقن تعاليم دينه على الأرض. الجزء المركزي من هذه المجموعة العنقودية، أي قلب المجموعة الأكثر ازدحامًا، له نصف قطر طوله خُمس فرسخ نجمي، وتبلغ كثافة النجوم فيه ٢٠٠٠٠ نجم لكل فرسخ مكعب، وهو مغمور في منطقة لها كثافة نجمية أقل تمتد إلى الخارج بنصف قطر طوله فرسخان وتحوي على الأقل ٢٢٠٠ نجم.

يمكننا الآن أن نقيس أيضًا أعمار بعض هذه النجوم بدقة معقولة، بدلًا من أن نكتفي بأن نقول: «إنها متوهجة، فلا بد أنها ناشئة.» عمليات الاندماج النووي التي تجرى في النجوم الداخلية تبني باطراد المزيد من النوى المركبة، بحيث إن النجوم التي تتكون حديثًا يكون لديها عمومًا مزيج من عناصر أثقل من الهيليوم، هو مزيج أكثر ثراء مما لدى النجوم التي تكونت منذ زمن بعيد، إلا أن هناك استثناءً واحدًا لهذه القاعدة، فالليثيوم — العنصر الثالث في الجدول الدوري — لا يُنتَج مطلقًا داخل النجوم، وكل ما في الكون الآن من الليثيوم قد تخلف من تكوين النوى في الانفجار الكبير. الأسوأ من ذلك (فيما يختص بالليثيوم) أن النجوم «تحرق»

الليثيوم في بعض التفاعلات النووية التي تجرى داخلها، وهكذا ففي كل جيل من النجوم يكون الليثيوم متاحًا بمقدار «أقل» مما كان متاحًا في الجيل السابق، ويعني هذا أن النجوم التي تحوي أقل مقدار من الليثيوم هي أحدث النجوم تكونًا. تتميز هذه الطريقة لتحديد تاريخ عمر النجوم بدقة مذهلة، وفي بدايات القرن الحادي والعشرين عندما استخدم علماء الفلك هذه التقنية وجدوا أن أكثر من عشرين نجمًا من نجوم سديم الجوزاء لها كتل تماثل كتلة شمسنا، وعمرها أقل من عشرة ملايين عام، وأن أصغرها ولد منذ ما لا يزيد عن مليون عام. يُعد هذا أفضل الأدلة وأوضحها على أن النجوم الناشئة ترتبط حقًّا بسحب الغاز والغبار في مجرة درب التبانة، والأعمار الأصغر التي تقارب المليون سنة تتوافق أيضًا مع أعمار فئة من النجوم تعرف باسم نجوم تي تاوري T Tauri، وهو اسم يرجع إلى مقارنة خصائصها المرصودة مع نماذج نظرية للنجوم الناشئة.

ما يُفرض طبيعيًّا كنتيجة لدراسة الكثير من مثل هذه المركبات، هو أن النجوم تولد وسط سحب كهذه، مصنوعة من المادة التي شدتها الجاذبية معًا، إلا أن السحب لا تلبث أن تتفرق بعدها، وسبب ذلك هو في جزء منه ضغطها إلى الخارج بواسطة الضوء وغيره من الأشعة الآتية من النجوم الصغيرة السن. سرعان ما تحترق بعدها النجوم الأكبر حجمًا والألمع، إلا أن النجوم الأصغر والأطول عمرًا (مثل شمسنا) تتخلف لتطوف هنا وهناك في درب التبانة آلاف الملايين من السنين، وقد فقدت كل اتصال بالمنطقة التي ولدت فيها.

هذه الخطوط العريضة لولادة النجوم كانت واضحة منذ ما يقرب من مائة سنة، وإن بقيت التفاصيل غامضة حتى زمن قريب جدًّا. الحقيقة أن صلة الارتباط بين سحب المادة المنبسطة وبين أصل النجوم هي صلة تُفترض على نحو طبيعي، حتى إنه في وقت يرجع إلى القرن السابع عشر كتب إسحاق نيوتن إلى ريتشارد بنتلي عندما طلب منه الأخير معلومات حول الكون فقال له:

> يبدو لي، أنه لو كانت مادة شمسنا وكواكبنا، وكل مادة الكون موزعة بالتساوي خلال كل السماوات، وكل جسيم له جاذبية

متأصلة تجاه سائر الجسيمات كلها، والفضاء الذي تتبعثر فيه هذه المادة هو كله محدود، فإن المادة في المنطقة الخارجية من هذا الفضاء سوف تنحو بواسطة جاذبيتها إلى أن تتجه إلى كل المادة التي في الداخل منه، ويترتب على ذلك أنها تتهاوى إلى منطقة الوسط من كل الفضاء، وتشكل هناك كتلة ضخمة كروية واحدة. أما لو كانت المادة تتوزع بالتساوي خلال فضاء لانهائي، فإنها لن تستطيع قط أن تتجمع في كتلة واحدة، وإنما سيتجمع بعضها في إحدى الكتل والبعض الآخر في كتلة أخرى، بحيث تصنع عددًا لانهائيًّا من الكتل الكبيرة، وإحداها على مسافة كبيرة من الأخرى خلال كل ذلك الفضاء اللانهائي. ومن ثم يمكن للشمس والنجوم الثابتة أن تتكون هكذا، مع افتراض أن المادة لها طبيعة صافية (جينز، «علم الفلك ونشأة الكون»).[1]

في الحقيقة، تشد الجاذبية معًا بالفعل كتلًا من المادة داخل سحب ما بين النجوم لتصنع نجومًا جديدة. ولكن هذه العملية لا بد أنها غاية في عدم الكفاءة. مجرة درب التبانة ظهرت إلى الوجود منذ زمن يزيد عن عشرة مليارات عام، إلا أنه لا تزال هناك سحب من الغاز والغبار بين النجوم، ولا يزال هناك إلى الآن بعض نشاط في تكوين النجوم. لماذا لم تتكثف كل المادة إلى نجوم منذ زمن طويل؟ لأن هناك فارقًا مهمًا بين نوع السحابة الاستاتيكية للمادة التي تصورها نيوتن وبين الحالة الدينامية للمادة في مجرة درب التبانة. لا ريب أن من الحقيقي أن سحابة استاتيكية من الغاز والغبار سوف تتقلص بتأثير وزنها الخاص، على الأقل إلى الحد الذي تغدو عنده ساخنة في داخلها بما يكفي لجعلها تبقى متماسكة. إلا أن مادة درب التبانة كلها، بما فيها النجوم نفسها والمادة التي صنعت منها النجوم، هي مادة في حالة حركة. لو كانت الأرض تبعد بالمسافة نفسها عن الشمس ولكنها ثابتة بالنسبة للشمس، لأخذت الأرض تتهاوى

[1] تبدو ملاحظات نيوتن على نحو أكثر تبصرًا إذا طبقناها على المجرات وليس على النجوم، على أن نيوتن لم يكن بالطبع يعرف أن مجرة درب التبانة مجرد مجرة واحدة بين مئات البلايين من المجرات في كون أكثر اتساعًا بدرجة هائلة.

في التو مباشرة إلى داخل الشمس، ولكنها لا تفعل ذلك لأنها تتخذ مدارًا، وتتحرك حول الشمس. المادة التي صنعت منها مجرة درب التبانة هي أيضًا تتخذ مدارًا، وتتحرك حول مركز درب التبانة، والسحب ما بين النجوم تدور هي نفسها ببطء حول مركزها هي نفسها، وذلك مع تحركات أخرى عشوائية تتراكب على هذه الحركة التي تكون تقريبًا دائرية. هناك «رياح» تشبه تلك الموجودة في جو الأرض، تحرك الغاز هنا وهناك داخل السحب، وهناك مجالات مغناطيسية ترتب السحب في خيط وتساعد على منع تقلصها.

مع كل ما يجرى هكذا، تكون المفاجأة هي أن تتكون أي نجوم بأي حال، في الحقيقة يقدر علماء الفلك أن هناك فقط مادة قدرها عدة أمثال قليلة للمادة في شمسنا (ما يساوي عددًا قليلًا من الكتلة الشمسية) تتحول سنويًا إلى نجوم جديدة في مجرتنا. يتوازن هذا تقريبًا مع مقدار المادة التي يعاد قذفها إلى الفضاء بواسطة النجوم الكبيرة السن عندما تموت. إحدى دلالات ذلك هي أنه لا بد أن نجومًا كثيرة قد ولدت حقًا في مدى قصير من الزمن أثناء العملية التي صُنعت فيها درب التبانة منذ كل تلك المليارات من السنين، قبل أن تقر في حالتها المستقرة الحالية. هذه الأحداث التي تعرف باسم «تفجرات النجوم» لا تزال تُرى الآن في مجرات أخرى، ولكننا لن نناقش أمرها أكثر من ذلك، لأن هذه ليست الطريقة التي تكونت بها منظومتنا الشمسية، منذ خمسة مليارات عام، عندما كانت درب التبانة قد استقرت بالفعل بطريقة حياتها الحالية لمليارات عديدة من السنين.

يمكننا أن ندرس الحركة العشوائية للسحب وللغاز داخل السحب، باستخدام التحليل الطيفي، مع مساعدة من ظاهرة دوبلر. يمكن لهذه الدراسات أن تكشف أيضًا عن تفاصيل أخرى للظروف داخل السحب، مثل كثافتها ودرجة حرارتها. الفضاء «الخاوي» ما بين النجوم، فيه في المتوسط ما يقرب من ذرة واحدة في كل ١٥ سنتيمترًا مكعبًا (وبالطبع فإن أغلبية هذه الذرات تكون إلى حد بعيد من الهيدروجين). النوع المتوسط من سحابة ما بين النجوم يكون فيه ما يقرب من ١٠٠٠٠ ذرة في الحجم نفسه، وقد تمتد السحابة نفسها عبر مسافة من ثلاثين أو أربعين سنة

ضوئية،[٢] بما يساوي تقريبًا أربعة أمثال المسافة من الشمس إلى أقرب نجم مجاور يماثلها، وهو نجم تاو سيتي Tau Ceti. على الرغم من أن السحب التي تكون النجوم اللامعة مغمورة فيها قد تصل في سخونتها إلى ١٠٠٠٠° سلسيوس، فإن أحد أهم الملامح في السحب التي يبدأ فيها التقلص لتشكل نجومًا جديدة هي أنها باردة أقصى البرودة، فدرجة حرارتها لا تزيد عن درجة الصفر المطلق إلا بأقل من ١٠ درجات (أقل من ١٠ كلفن، أو أقل من «ناقص» ٢٦٣° سلسيوس).

معظم السحب في مجرتنا لا تتقلص لتشكل نجومًا. فهي تقريبًا في حالة توازن، مدعوم بوجه خاص بالمجالات المغناطيسية والدوران. إذا تكوّن نجم بكتلة الشمس وكان تكوينه مباشرة نتيجة تقلص سحابة غاز تدور ببطء وتحوي الكتلة نفسها ولكنها قد امتدت منبسطة بكثافة سحابة من سحب ما بين النجوم، فإنها ستلف بأسرع وأسرع وهي تنكمش، مثلما يلف نفسه لاعب التزلج على الجليد وهو يضم ذراعيه إلى الداخل. بحلول الوقت الذي يصبح فيه الجرم بحجم الشمس، ستكون سرعة لف خطه الاستوائي هكذا سرعة قريبة من ٨٠ في المائة من سرعة الضوء، ومن الواضح أن هذه نتيجة تبعث على السخرية. إذن، فإن إحدى العمليات المفتاح في تشكيل النجم هي التخلص من هذا اللف الزائد، أو الكمية الزائدة من الحركة الزاوية. أحسن طريقة لفعل ذلك هي أن يكون البدء بكتلة أكبر كثيرًا، وأن يُلقى بعض منها بعيدًا في الفضاء، ليحمل معه قدرًا من الحركة الزاوية، أثناء تقلص المنطقة المركزية، هذا أمر تتم رؤيته وهو يحدث في مناطق تكوين النجوم، إلا أن تفاصيل الطريقة التي يتم بها بالضبط قذف المادة الزائدة لا تزال غير واضحة. أحد الحلول الأخرى للمشكلة هي أنه إذا كان هناك نجمان (أو أكثر) يتكونان من السحابة المتقلصة نفسها، فسيتحول عندها الكثير من الحركة الزاوية للسحابة إلى الحركة المدارية للنجوم. مما له أهميته، أن ما يقرب من ثلثي كل النجوم تكون في أزواج ثنائية أو في منظومات أكثر تعقيدًا. وعلى نطاق أصغر كثيرًا، فإن كواكب المنظومة الشمسية التي تدور

---

[٢] باستخدام الوحدات التي يستعملها عادة علماء الفلك يساوي ذلك ما يقرب من ١٠$^{-١٢}$ فرسخ نجمي، الفرسخ النجمي الواحد يساوي ٣,٢٦ سنة ضوئية.

حول الشمس، كلها تحمل حركة زاوية مختزنة من تقلص السحابة التي تشكلت فيها المنظومة الشمسية. ومن المرجح أن نجمًا بلا كواكب سيلف بأسرع من نجم له كواكب.

عندما كنت طالبًا، تعلمنا أن النجوم تتكون من سحابة متقلصة من خلال عملية تقلص وتشظي تطّرد بثبات إلى حد بعيد «شبه استاتيكية». السحابة التي تحوي مادة مقدارها ألف ضعف كتلة شمس ربما يكون من المتوقع أنها ستنتج ما يقرب من ألف نجم، فتتقلص أولًا ببطء حتى تصبح غير مستقرة، وعندها تأخذ الأجزاء المختلفة من السحابة في التقلص بتأثير جاذبيتها هي نفسها، وبعدها فإن هذه الأجزاء من السحابة تتشظى وتتقلص بدورها إلى أجزاء أصغر، وتتكرر العملية مرات عديدة. هذه العملية من التقلص والتشظي تستمر مطردة إلى حد بعيد، مع تحول الطاقة الجذبوية إلى حرارة بطول العملية، حتى تصبح الشظايا ساخنة سخونة كافية لتسطع كنجوم أولية. حسب هذه الصورة من النمط القديم، تتكون النجوم كلها مصحوبة بنجوم أخرى، ولكنها ما إن تتكون، حتى تتبع مداراتها الخاصة بها حول المجرة، بحيث إنه في خلال مئات قليلة من ملايين السنين تنتشر النجوم متباعدة أحدها عن الآخر، ولا يوجد سبيل لاقتفاء أثر أصلها المشترك.

على أننا الآن نعتقد أن تكوين النجوم يتم بعملية فيها ما يتصف بالعنف، والخشونة والتعثر بدرجة أكبر كثيرًا. لا يزال من الواضح أن النجوم تتشكل بالفعل معًا بهذه الطريقة، ولكن ذلك لا يكون نتيجة لانكماش سلس تدريجي لسحابة الغاز والغبار. ما طرأ من تغيير في تفكيرنا ناتج عن تنفيذ أرصاد أفضل ونماذج نظرية أفضل لما يجري داخل تلك السحب. تحوي هذه السحب غبارًا بالغ الكثرة، وبسبب ذلك لا يمكن رؤية مراكزها إلا بالجزء تحت الأحمر من أشعة الطيف — الضوء تحت الأحمر يخترق الغبار.[٣] على أن الأشعة تحت الحمراء يعوق مسارها إلى حد بعيد بخار الماء الموجود في جو الأرض، ومن ثم فقد ظل من غير الممكن إنعام النظر

[٣] سنجد أنه حتى الضوء الأحمر يخترق الغبار على نحو أفضل من أشعة الضوء ذات الموجات الأقصر، وهذا هو السبب في أن الشمس الغاربة عندما تشاهد من خلال الطبقات السفلى المغبرة من جو الأرض، تبدو حمراء.

في مراكز مناطق تكوين النجوم إلى أن تم تطوير الأقمار الصناعية لتحمل تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء لأعلى، وكذلك تطوير تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء التي تتخذ موقعها فوق قمم الجبال العالية بحيث يكون معظم الجو في أسفلها (وأساسًا كل بخار الماء). وكمثل لذلك، فإن بعض أهم هذه الأرصاد الجديدة أتت من تلسكوب جيمس كلارك ماكسويل في مرصد موناكي في هاواي، أحد الأجهزة الرئيسية الملحقة بالتلسكوب يعرف عند علماء الفلك، مع ولعهم بالاختصارات بأنه «سكوبا SCUBA» وهو اختصار: "The Sub-millimeter Common-User Bolometer Array"، مصفوفة البولومتر[4] للقياس العام لما تحت الملليمتر». أخذت الأرصاد الجديدة تفد منذ منتصف تسعينيات القرن العشرين، وفي الوقت نفسه جرت تحسينات لقوة الكمبيوتر وسرعته مما جعل من الممكن إجراء محاكاة لما يجري داخل السحب، تمامًا مثلما أدت هذه التحسينات نفسها في الكمبيوترات إلى تطوير فهمنا لطريقة تنامي البنية في الكون المتمدد بعد الانفجار الكبير.

هناك أرصاد أخرى ترجع إلى منتصف القرن العشرين، إلا أنه لا تزال تجرى تحسينات لها، لتوفر بصيرة نافذة في أمر طبيعة مركّبات الغاز-الغبار والطريقة التي تتمكن بها من ولادة النجوم. من بين ذلك اكتشاف أن هذه المنظومات لا تقتصر على أنها تحوي ذرات فقط، وإنما هي تحوي كذلك جزيئات. يتم تعيين هذه الجزيئات بتحليل الطيف بموجات الراديو، ومن بين أول ما وجد هنا (CH)، (CN)، (OH). هناك أيضًا جزيئات أكثر تعقدًا بما في ذلك (CH_2HCO)، (CH_3HCO)، (CH_3CN). تم الكشف أيضًا عن جزيئات هيدروجين (H_2)، (وكلها تعطي لهذه المركبات المعقدة اسمًا آخر، هو سحب الجزيئات الماردة). حقيقة أن هذه الجزيئات موجودة في السحب تكشف عن الكثير من الظروف هناك. مثال ذلك أن ذرات الهيدروجين التي تصطدم إحداها بالأخرى في الفضاء الخاوي سوف تتواثب مرتدة إحداها عن الأخرى، ولن تتمكن ذرات الهيدروجين من أن تلتصق معًا لصنع جزيئات

---

[4] البولومتر: أداة لقياس طاقة الإشعاع بربط مقاومة عنصر كهربائي بكمية الطاقة الممتصة. (المترجم)

إلا إذا تفاعلت معًا فوق سطح حبيبة غبار. ومن ثم فإن كثافة الهيدروجين الجزيئي في السحب تنبئنا بأنه لا بد أن يكون هناك في كل سنتيمتر مكعب من السحابة ما لا يقل عن مائة حبيبة غبار، تشبه في حجمها ما يوجد من جسيمات في دخان السيجارة. تؤدي حبيبات الغبار مهمة أخرى أيضًا. فلو لم تكن موجودة، لنتج عن احتراق السحابة بالأشعة فوق البنفسجية الآتية من النجوم القريبة أن تتكسر جزيئات الهيدروجين متفرقة، إلا أن الغبار يحمي الهيدروجين حاجبًا إياه عن تأثير الضوء فوق البنفسجي بدرجة فعالة، بحيث إن سحابة كثيفة مثل سديم الجوزاء لا بد أن فيها مقدارًا من عشرة ملايين جزيء من الهيدروجين في كل سنتيمتر مكعب.

جزيئات الغاز في درب التبانة تتركز في مركّبات معقدة كبيرة بتأثير المجالات المغناطيسية وعمليات المد والجزر في القرص الدوار من المجرة. قد يكون عرض هذه المركبات الكبيرة بمقدار آلاف من الفراسخ، وتحوي مادة مقدارها عشرة ملايين كتلة شمسية، إلا أن السحابة الجزيئية الماردة المفردة لن يزيد عرضها عن ١٠٠ فرسخ نجمي وتصل كتلتها إلى مليون كتلة شمسية. يبلغ متوسط الحجم (الوسيط) ما يقرب من ٢٠ فرسخًا نجميًّا، ومتوسط الكتلة (الوسيط) ما يقرب من ٣٥٠٠٠٠ كتلة شمسية. من الممكن أن تُجرف هذه المادة أيضًا في سحابة بواسطة تفجر سوبرنوفا، مما يرسل موجات صدمة تنداح خلال وسط ما بين النجوم، هناك أدلة مباشرة، تؤخذ من نسبة وفرة النظائر النادرة التي توجد في عينات النيازك، وتدل على أن السحابة التي تكونت منها منظومتنا الشمسية قد ارتطمت بموجة صدمية من هذا النوع بالضبط في وقت يسبق مولد الشمس بما يقرب من مليون سنة. توزيع المادة داخل هذه السحابة يبدو إلى حد ملحوظ مشابهًا لتوزيعها الذي نراه في محاكيات تكوين البنية في الكون المبكر، فنرى صفحات وخيوطًا من الغاز وكتلًا من المادة الأكثر كثافة حيث تلتقي الخيوط، ينساب الغاز بطول الخيوط ويتجمع عند نقط معينة، خاصة حيث تتقاطع الخيوط. يشبه هذا النمط الخرز في قلادة، ويتكرر بمقاييس أصغر داخل السحابة، بحيث إنه بصرف النظر عن الحجم فإن هذا النوع التقليدي من الغاز الموجود في وحدة فرعية يماثل النوع التقليدي في السحابة «الأم»،

هذه البنية التراتبية تكون تقريبًا بمنوال المتشكلات° fractal. يمكن الآن دراسة هذه السحب تفصيليًا، وينتج عن ذلك أنه بمجرد ظهور هذه السحب بأشكالها غير المنتظمة والخيطية التي تبدو بالفعل كالمنفوثة بالرياح (بمثل لقطة مقربة لسحابة في جو الأرض تشاهَد من إحدى الطائرات)، فإن هذا يوضح أنها أبعد من أن تكون في حالة توازن.

يتلاءم هذا كله مع صورة جديدة نسبيًا لما يجري داخل سحب الجزيئات، في نموذج تهيمن عليه تأثيرات الاضطراب الدوامي في الغاز. الرأي الآن أن تدفقات الاضطراب الدوامي، وليس المجالات المغناطيسية، هي العامل الرئيسي الذي يمنع التقلص السريع للسحب، في حين أن الاصطدامات بين تدفقات الغاز التي تتحرك بسرعة تفوق الصوت (أي أنها أسرع مما يقرب من ٢٠٠ متر في الثانية، تحت هذه الظروف) تنتج عنها موجات صدمية تستطيع فيها أجزاء من السحابة أن تأخذ في التقلص لتشكل نجومًا. الجاذبية والاضطراب الدوامي يتساويان في الأهمية في تحديد بنية هذه السحب وطريقة تتطورها، النجوم تتكوّن فقط عندما تهيمن الجاذبية محليًا. من الواضح أيضًا أن السحب نفسها هي ظواهر غير مستقرة وقصيرة العمر بالمقاييس الزمنية لدرب التبانة. إلا أن السبب بالضبط الذي ينتج عنه تدفقات الاضطراب الدوامي بسرعة عالية لا يزال إلى حد ما من الأسرار، ومن ثم فعلى الرغم من أننا نعرف أن هناك اضطرابًا دواميًا موجودًا، فإنه عندما يصل الأمر إلى محاولة فهمه، هو وتفاصيل تشكيل النجوم، نجد أننا نعود ثانية إلى عالم ما «نظن» أننا نعرفه.

ثمة أمر نعرفه على وجد التأكيد، وهو أن السحب لا تستطيع أن تتقلص إلا لأنها باردة جدًا. الغبار نفسه الذي يمنع الأشعة فوق البنفسجية الآتية من الخارج من أن تمزق جزيئات الهيدروجين، يشكل درعًا واقيًا لقلوب السحب يحميها من مصادر الطاقة، في حين أن الجزيئات التي في السحابة، وخاصة أول أكسيد الكربون، تشع طاقة تحت الحمراء وتبرد

° المتشكلات كيانات هندسية يكون الواحد منها ظاهريًا غير منتظم، وينشأ عنها بالتكرار وحسب معادلة رياضية وحدات فرعية لشكل هندسي أساسي يتناقص حجمه دائمًا، وكثيرًا ما تستخدم المتشكلات في الكمبيوتر لرسوم الجرافيك. (المترجم)

السحابة. (الغبار عند هدب السحابة يسخن إذ يمتص الطاقة من الخارج، ولكن هذا لا يؤثر في القلب البارد للسحابة). الشظايا الصغيرة للسحب التي تصغر كتلتها إلى كتلة شمس واحدة لا يمكن لها أن تتقلص مطلقًا إلا إذا بردت حرارتها إلى أقل من ١٠ كلفن، لو كانت أسخن من ذلك ولو بأدنى الدرجات، فإن طاقة حرارتها تسبب ضغطًا إلى الخارج يكون كافيًا لأن يمنع الجاذبية من أن تجعلها تتقلص.

على الرغم من أن هناك أمورًا كثيرة مهمة تجري في السحب الجزيئية العملاقة بمقاييس طولية زمنية مختلفة، إلا أننا نهتم هنا على وجه خاص بأن نعرف من أين تأتي النجوم مثل الشمس (والكواكب مثل الأرض)، وهكذا سوف نلقى نظرة تفصيلية فقط على ما يحدث بهذا المقياس المتواضع نسبيًا. أهم ما يتضح من أرصاد النجوم المصاحبة لهذه السحب، وكذلك أيضًا من محاكيات الكمبيوتر، هو أن النجوم لا تتكون في عزلة. تتكون معظم النجوم إلى حد بعيد وهي مصحوبة على الأقل بنجم واحد أو اثنين في رفقتها، ومن الممكن أن تكوين كل النجوم يتم بهذه الطريقة. ومن ثم فمن المرجح غالبًا أن النجوم المنعزلة مثل شمسنا قد قذف بها خارج منظومات كهذه في مرحلة مبكرة من حياتها.

هذه العملية هي بالفعل عملية سهلة وطبيعية، ولا تتطلب أي شيء أكثر تعقيدًا من مجرد الجاذبية وقوانين ميكانيكا مدارات الأفلاك التي استنتجها إسحاق نيوتن منذ ثلاثة قرون ونصف القرن. عندما يكون هناك ثلاثة نجوم لها تقريبًا الكتلة نفسها وهي تدور في فلك أحدها حول الآخر، يكاد يكون من المحتم أنه عاجلًا وليس آجلًا سيحدث نوع من ظاهرة كالجذب بمقلاع ينتج عنها انطلاق أحد النجوم مندفعًا بعيدًا في الفضاء، وهو يحمل معه كمية من الحركة الزاوية، بينما يدور النجمان الآخران أحدهما حول الآخر في مدار أكثر قربًا. يمكن أن يقع هذا النوع نفسه من الأحداث إذا كان هناك بداية أكثر من ثلاثة نجوم في المجموعة، أما عندما يكون هناك نجمان فقط باقيان، فإنهما يظلان باقيين في زوج ثنائي محبوس في عناق جذبوي.

من الواضح أنه لا توجد فترة لها قدرها بين تشظي سحابة جزيئية عملاقة وبداية تشكيل النجوم، ويتضح هذا جزئيًا من فهمنا الجديد للطبيعة

الدينامية للسحب الجزيئية العملاقة، كما يتضح جزئيًا من الملاحظة الواضحة بأنه لا يعرف إلا القليل جدًا من سحب كهذه لا تحوي مناطق تكوين نجوم. تلتحم السحب، فتتشكل النجوم، ويخرج إشعاع من النجوم الساخنة الصغيرة السن فينفث السحابة بعيدًا، وتنتهي العملية كلها خلال عشرة ملايين سنة. تتكون سحابة، وتؤدي مهمتها في تشكيل النجوم، وتتشتت كليًا خلال الوقت الذي تستغرقه موجة صوت لتنتقل من جانب من السحابة إلى الآخر — الأمر الذي يشير إليه علماء الفلك على أنه «زمن العبور».

ولكن دعنا نتذكر أن أحد الأسباب في أن سحابة من الغاز والتراب تتقلص لتكوّن النجوم هو أنها قد انضغطت بالنوع نفسه من موجات الصدمة الناتجة عن السوبرنوفات والرياح من النجوم الصغيرة السن، التي تنتشر خلال وسط ما بين النجوم، وتشتت المادة المحلية التي تحيط بتلك النجوم سريعًا بعد ولادتها. من المثير للاهتمام، أن الأدلة الآتية من المجرة ككل تطرح أن هذه عملية ذاتية التنظيم وتستطيع أن تعمل بحالة مستقرة مطردة تقريبًا طيلة مليارات كثيرة من السنين. عندما يتكون الكثير من النجوم في أحد الأجيال، يُنفث الغاز والغبار بعيدًا لينتشرا انتشارًا واسعًا، الأمر الذي يجعل من الأصعب تكوين نجوم جديدة. عندما تتكون فقط نجوم قليلة، لا يتشتت الغاز بهذا الانتشار الواسع، ويكون من السهل تكوين نجوم في الجيل التالي. إذن، عندما يحدث بأي حال أن تتحرك العملية تجاه هذا الطرف الأقصى أو ذاك، فإنها تنحو إلى أن تتحول ثانية في الجيل التالي تجاه ما يكونه المتوسط على المدى الطويل.

لا يكاد يدهشنا أن النجوم الأصغر سنًا في سحابة جزيئية تكون موجودة في المناطق الأكثر كثافة في السحابة، على أنه لا يزال هناك سؤال مفتوح حول مدى أن تكون هذه البنية المتكتلة (وكثيرًا ما يصحب ذلك طبقات تراتبية من التكتلات داخل التكتلات داخل التكتلات) نتيجة لقوى ضغط الجاذبية التي تهيمن عندما تزداد الكثافة الزيادة الكافية، وإلى أي مدى يحدث أن يكون هناك دور تلعبه موجات الصدمة المصاحبة لتدفقات الاضطراب الدوامي، التي تستطيع أن تضغط المناطق المحلية إلى كثافة أكبر من مائة مثل لما يحيط بها مباشرة. على أن العمليات الحسابية تطرح أن

الكبس بالاضطراب الدوامي يمكن أن يسبب تخليق قلوب قبل نجمية، أي مناطق من كثافة أعلى من المتوسط على وشك أن تتقلص جذبويًّا. وفقًا للحسابات فإن هذه القلوب لديها حرارة داخلية تقرب من ١٠ كلفن وقد يكون لها عرض من حوالي ٠,٠٦ فرسخ نجمي (ما يقرب من خُمس سنة ضوئية)، وتحوي كتلة تقرب من ٧٠ في المائة من كتلة شمسنا. القلوب التي تُرى بالفعل في السحب الجزيئية لها خصائص مماثلة لذلك تمامًا، مما يجعل الكبس بالاضطراب الدوامي تفسيرًا في المقدمة من تفسيرات تكوين الأجرام قبل النجمية. ثم لا تلبث الجاذبية أن تتولى الأمر — وتعوقها المجالات المغناطيسية والحاجة إلى التخلص من الحركة الزاوية.

ولكن على الرغم من أن ما يقرب من نصف كتلة الغاز قد تتحول إلى نجوم في التكتلات الأقصى تكثفًا في السحابة، فإن ما يحتمل أن يحدث في السحابة كلها عمومًا هو أن نسبة من المادة لا تزيد عن نسبة قليلة في المائة هي التي تتحول إلى نجوم قبل أن تتشتت السحابة منتشرة. عندما نركز على تفاصيل الطريقة التي يتكون بها فعلًا النجم الفرد، يكون من الجدير بالذكر أن تكوين النجوم ليس بوجه عام عملية تتسم بكفاءة بالغة.

على أنه أيًّا كانت طريقة تكوين القلب قبل النجمي، فإننا نعرف أن هذه القلوب موجودة لأننا نستطيع أن نراها، ونحن نستطيع أن نستخدمها كنقط بداية للتفسير التفصيلي للطريقة التي تتشكل بها نجوم كالشمس. ما نفهمه عما يحدث بعد ذلك يكاد يعتمد كليًّا على محاكيات الكمبيوتر، ونجد أن النماذج المختلفة (كما مثلًا مع المقادير المختلفة من التأثير المغناطيسي) تعطي تنبؤات مختلفة حول طريقة وقوع تفاصيل التقلص، وبوجه خاص حول مدى سرعة وقوعها. على أن كل المحاكيات تعطي التنبؤ المثير نفسه — وهو أنه في المرحلة الأولى من تكوين أحد النجوم، ليس غير جزء ضئيل من كتلة السحابة المتقلصة سيصل إلى الكثافة الضرورية لتحولها إلى نجم. بدلًا من أن يحدث أن سحابة بأكملها لها كتلة الشمس تنكمش على نفسها على نحو يكاد يكون متسقًا حتى تصبح جرمًا مثل شمسنا، فإن ما يقع بدلًا من ذلك هو أن جرمًا عند مركز السحابة له فقط كتلة مقدارها ٠,٠٠١ من كتلة الشمس يصبح كثيفًا وساخنًا بما يكفي

لكي يستقر، وسرعان ما يأخذ بعدها في توليد الطاقة بالاندماج النووي. ثم يحدث بعد ذلك، عبر فترة من الزمن أطول كثيرًا من ذلك، أن تنمو باقي كتلة النجم في تراكم بالتلاحم، عندما تتهاوى عليه المادة من السحابة المحيطة فوق سطح النجم الأولي.

لا يؤثر الدوران والمغناطيسية في هذه العملية من تكوين للنجم الأولى الضئيل الحجم، وإن كان الدوران مسئولًا عن أن السحابة المتقلصة تكوّن اثنين أو ثلاثة من هذه النجوم الأولية وأحدها يدور حول الآخر بدلًا من تكوين قلب واحد. السحابة الدوارة تتقلص إلى قرص من المادة حول النجم الأولى (قرص واحد حول كل نجم أولي)، ووفقًا لبعض العمليات الحسابية فإن التوزيع غير المتساوي للمادة في قرص كهذا يمكن أن يسبب تراوحات تنقل بعض المادة إلى الخارج، فتأخذ كمية من الحركة الزاوية بعيدًا عن النجم الأولي، في حين يُدفع بالبعض الآخر إلى الداخل ليكون وقودًا للتراكم بالالتحام. أي موجة من هذا النوع لها نمط من ذيل ينسحب وراءها (مع انحناء أذرع اللولب إلى الخلف بالنسبة للدوران) تؤدي دائمًا إلى نقل الحركة الزاوية إلى الخارج، مما أدى ببعض علماء الفلك إلى أن يصفوا الأقراص التراكمية بأنها ماكينات تنتزع من الغاز حركته الزاوية. أحد الإمكانات الأخرى هي أن تؤدي المجالات المغناطيسية التي تقع في أسر النجم الأولي إلى أن تعمل كقُمع يوجه بعض المادة التي تهوي إلى الداخل تجاه النجم لتتجه ثانية إلى الخارج في الفضاء كنوافير تبعث من أقطاب النجوم، للتخلص مرة أخرى من فائض الحركة الزاوية؛ تشاهَد نوافير كهذه في الكثير من النجوم صغيرة السن، وإن كان هذا التفسير لها لا يزال مجرد تخمين يفترض.

الجمال الرائع في كل هذه الحسابات هي أنها تنبئنا بأنه أيًا كان نوع السحابة التي نبدأ بها، وأيًا كان ما لديها من الدوران، والمجالات المغناطيسية، والخصائص الأخرى، فإننا دائمًا نحصل على النوع نفسه من تكوين جرم مركزي مدموج. ومن ثم فإنه مع وصولنا إلى الوقت الذي تأخذ فيه المنطقة المركزية في أن تسخن لا يكون هناك داع لأن نقلق حول ما حدث قبلها. يحدث ذلك عندما تزيد الكثافة بالدرجة الكافية لأن يقع الإشعاع تحت الأحمر في الأسر بدلًا من أن يهرب من القلب، الكثافة المطلوبة لذلك

تقرب من ١٠-١٣ جرام لكل سنتيمتر مكعب، وهو ما يناظر وجود ما يقرب من ٢٠ مليار جزيء هيدروجين في كل سنتيمتر مكعب. ولا يلبث بعدها أن يؤدي الضغط المتزايد داخل القلب إلى أن يوقف التقلص عندما تزيد الكثافة المركزية بعامل يقرب من الألفين، حيث يوجد ٤٠٠٠٠ مليار جزيء هيدروجين في كل سنتيمتر مكعب (ما يقرب من خُمس جزء من المليار من الجرام لكل سنتيمتر مكعب). يكون لهذا القلب كتلة تقرب من جزء من المائة من كتلة الشمس، ويمتد عبر حجم له نصف قطر أكبر بمرات عديدة من المسافة بين الأرض والشمس. إلا أن استقرار القلب قصير زمنيًّا، لأن الحرارة داخله تستمر في الارتفاع، وعندما تصل الحرارة إلى ٢٠٠٠ كلفن، تتكسر جزيئات الهيدروجين مفتتة إلى الذرات المكونة لها.

يؤدي هذا إلى تغير سلوك الغاز ويتيح أن تحدث مرحلة ثانية من التقلص، تكون بالطريقة نفسها كما حدث من قبل لتؤدي إلى إنتاج قلب «داخلي» جديد في القلب الداخلي السابق. لا يتوقف تقلص هذا القلب إلا عندما يصبح ساخنًا في الداخل بما يكفي لانتزاع الإلكترونات من ذرات الهيدروجين لتشكل بلازما[٦] متأينة،[٧] تحدث عند وقت وصول درجة الحرارة إلى ١٠٠٠٠ كلفن، إلا أنه في هذه المرة يظل التقلص دائمًا. عملية التأين هذه هي بالطبع عكس عملية إعادة الاتحاد التي حدثت في الكون عمومًا عندما كان عمره مئات ألوف قليلة من السنين. وكما أن الكون غدا شفافًا في ذلك الوقت، لأنه لم يعد هناك بعد أعداد كبيرة من الجسيمات المشحونة هنا وهناك ليتفاعل معها الضوء، فبمثل ذلك تمامًا يحدث أنه عندما يتأين القلب قبل النجمي فإنه يغدو معتمًا، لأن الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل القلب يرتد متواثبًا فيما حوله بين الجسيمات المشحونة. يبدو هذا كتحديد جيد للحظة التي يصبح فيها القلب نجمًا.

هذا القلب الداخلي هو ما يشكل البذرة التي سينمو عليها النجم — قلب نجم أولي له كتلة لا تزيد عن جزء من الألف من كتلة الشمس، ويشغل

---

[٦] البلازما مرحلة من التأين العالي للغازات يتساوى فيها تقريبًا عدد الأيونات الموجبة مع عدد الإلكترونات، ومن ثم تكون متعادلة كهربائيًّا. (المترجم)

[٧] التأين: تكوين أيونات. والأيون ذرة أو مجموعة ذرات متماسكة لها شحنة موجبة أو سالبة. (المترجم)

حجمًا يماثل تقريبًا حجم الشمس الآن، ولكنه يتزايد باطراد في كتلته إذ تهوي عليه مادة تأتي من الخارج (نصف القطر يزيد فقط زيادة قليلة، ليصل إلى عدة أمثال قليلة لنصف قطر الشمس، حيث إن التأثير الرئيسي للنمو بالتراكم هو أن يجعل النجم الأولي أكثر كثافة). يقع غاز القلب الأول على النجم الأولي خلال ما يقرب من عشر سنين، ليصل بكتلته إلى ما يقرب من ٠,٠١ من كتلة الشمس، ولكن هذا لا يزال يترك إلى حد بعيد معظم كتلة السحابة الأصلية المتقلصة لتستمر في التساقط على النجم الأولي. كما ذكرنا فيما سبق، فإن تكوين قرص من المادة حول النجم المركزي يعد ملمحًا ضروريًّا في هذه العملية (فيما عدا الحالة اللاواقعية لجرم غير مغناطيسي وغير دوار)، ومنذ وفود تلسكوب هابل الفضائي في أواخر القرن العشرين تمت رؤية أقراص غبارية من المادة حول الكثير من النجوم الصغيرة السن. لهذا دلالاته الواضحة في تشكيل الكواكب، وسوف نعود سريعًا إلى هذا الموضوع المهم.

يعتمد حجم النجم الذي يتنامى من البذرة قبل النجمية على مقدار المادة المتاحة لكي تتراكم ملتحمة معه، وليس على حجم القلب، وذلك لأن كل القلوب تبدأ ولديها تقريبًا الكتلة نفسها. على أن من الأمور الحاسمة أن الطريقة التي يحدث بها التشظي والتقلص تعني أن كل نجم (أو كل مجموعة من نجمين أو ثلاثة نجوم) يتشكل من شظية من السحابة الجزيئية تكون من قبل قد قطعت منفصلة عما يحيط بها، ومن ثم فإن كمية المادة المتاحة للتراكم تكون محدودة تحديدًا صارمًا، وتعتمد الكتلة النهائية للنجم على حجم الشظية. في حالة النجم المماثل للشمس، يعني هذا أن ما يقرب من ٩٩ في المائة من كتلته يتم اكتسابها بالتراكم.

عندما تصل كتلة القلب إلى ما يقرب من خُمس كتلة الشمس، يكون القلب قد أصبح ساخنًا في الداخل بما يكفي لكي يبدأ الاندماج النووي، ولكن هذا ليس بتفاعل سلسلة البروتون-البروتون الذي يزود بالطاقة التي تبقي الشمس الآن ساطعة. أول عملية اندماج تحدث في قلب من هذا النوع تستخدم الديوتروم، النسخة الثقيلة من الهيدروجين حيث كل نواة تتكون من بروتون ونيوترون رُبطا معًا بالقوة النووية القوية. عندما ينتهي التراكم،

نجد في حالة النجم الذي له كتلة شمس واحدة أن النجم الصغير السن يكون له نصف قطر يقرب من أربعة أمثال نصف قطر الشمس حاليًا، ثم ينكمش تدريجيًا حتى يستقر أخيرًا في حياته كنجم ناضج — أو ما يسميه علماء الفلك بأنه نجم في «التتابع الرئيسي».[8] أثناء هذا الانكماش نجد أن الطاقة التي تبقي النجم ساطعًا تأتي غالبًا من الطاقة الجذبوية التي تنطلق أثناء انكماش النجم، لا يحدث إلا عندما يسخن داخل النجم بالدرجة الكافية (ما يقرب من ١٥ مليون كلفن) أن يبدأ تفاعل البروتون–البروتون وعندها تتولى الطاقة النووية الأمور وتوقف أي مزيد من الانكماش في النجم. إلا أنه قبل أن يصل النجم إلى الاستقرار، وأيًا كانت كتلته، فإنه دائمًا يمر بمرحلة تمتزج فيها المادة داخله امتزاجًا كاملًا بواسطة تيارات الحمل الحراري. ومن ثم فإن نسبة العناصر التي نراها الآن في طبقات سطح أي نجم في التتابع الرئيسي (بما في ذلك الشمس) يكون فيها مرشد دقيق عن مزيج العناصر في السحابة التي تكون منها النجم. لا يتأثر هذا بالعمليات التي تجرى في الأعماق من داخل النجم حيث يتغير الهيدروجين إلى هيليوم، أو (في حالة بعض النجوم) حيث يتحول الهيليوم إلى كربون، وذلك لأن النجوم في التتابع الرئيسي لا يعمل فيها الحمل الحراري على نحو كامل، ولا يتم رفع المادة التي في القلب إلى السطح.

يصف علماء الفلك المراحل المختلفة في عملية النمو بالتراكم بلغة من أربع «فئات» تحدد عشوائيًا، ولكنها تعطي فكرة تقريبية عن مدى طول زمن كل خطوة تُتخذ في العملية. هناك المرحلة «اللانجمية» لتقلص السحابة والتنامي المبكر للقلب حتى يصبح معتمًا، وهي تستغرق ما يقرب من مليون سنة. فئة «الصفر» تقابل مرحلة مبكرة من التراكم السريع فوق القلب، تستمر عشرات قليلة من ألوف السنين وتنتهي بأن يتم على الأقل تراكم نصف الكتلة النهائية، الفئة I هي أطول مراحل التراكم، ويتم فيها إضافة معظم باقي الكتلة ولكن ذلك يكون بمعدل سرعة أبطأ، ويستمر

[8] التتابع الرئيسي: رسم بياني معروف في علم الفلك رتبت فيه النجوم على خط قطر مائل من أعلى اليسار حيث النجوم الأكثر حرارة وضياء، إلى أسفل اليمين حيث النجوم الأبرد والأقل ضياء. ويحوي هذا التتابع ما يقرب من ٩٠٪ من كل النجوم المعروفة. (المترجم)

فترة من مئات قليلة من ألوف السنين، الفئة II تقابل انبثاق النجم «تي تاوري T Tauri» الصغير السن الذي لا يزال محاطًا بالغبار، وتستمر ما يقرب من مليون سنة، الفئة III تغطي الفترة التي لا يعود فيها بعد النجم الصغير السن محاطًا بالغبار ويتقلص ليدخل التتابع الرئيسي، وهي فترة تستغرق ما يصل إلى عشرات قليلة من ملايين السنين.

الأدلة على هذه المقاييس الزمنية تأتي جزئيًا من النمذجة وجزئيًا من الرصد — مثال ذلك أننا نرى الآن عددًا من فئة I من النجوم الأولية يصل إلى عشرة أمثال ما نراه من فئة الصفر، إلا أن كل جرم من فئة I لا بد أنه كان هو نفسه ذات مرة أحد أفراد فئة الصفر، ومن ثم فإن الاستنتاج الطبيعي هو أن كل نجم يقضي زمنًا في المرحلة I أطول بعشر مرات مما يقضيه في المرحلة صفر. يعني هذا عمومًا أنه حتى ينتهي أحد النجوم إلى كتلة تماثل شمسنا فإنه يستغرق لذلك ما يقرب من عشرة ملايين سنة ليتطور من سحابة غاز وغبار على وشك التقلص ليصبح نجمًا يدخل إلى التتابع الرئيسي. النجم الذي ينتهي إلى كتلة تبلغ ١٥ كتلة شمسية يستغرق فحسب ما يقرب من مائة ألف سنة ليصل إلى المرحلة نفسها في حياته.

كما سبق أن ذكرنا، نجد إلى حد بعيد أن معظم النجوم (وربما كل النجوم) لا بد أنها تتكون في منظومات فيها تعدد للنجوم، وذلك على الأقل بسبب مشكلة كمية الحركة الزاوية، بحيث إن النجوم المعزولة مثل شمسنا هي نجوم هائمة جوالة تم قذفها بواسطة رفاقها السابقين. كان من الشائع الاعتقاد أن كلمة «تعدد» قد تعني أن يتشكل معًا أربعة، أو خمسة نجوم أو أكثر، كما أن بعض محاكيات الكمبيوتر تطرح أيضًا أن القلوب، قبل النجمية قد تتشظى إلى قطع كثيرة. إلا أن هناك تحليلًا أجراه في ٢٠٠٥ الباحثون في جامعة كارديف وجامعة بون أوضح أن الحال ليس هكذا. ثبت في النهاية أن من السهل جدًا للتجمعات العنقودية الصغرى التي تحوي نجومًا كثيرة — وهي تسمى «بالصغرى» لأن التجمعات العنقودية الكروية تكون أجرامًا أكثر كثيرًا وربما تحوي مليون نجم فردي، قد تشكلت معًا عندما كان الكون صغير السن — هذه التجمعات الصغرى يسهل جدًا أن تقذف بأعضائها الواحد بعد الواحد في كل مرة، إلا أن هذا سيؤدي إلى أن

نرصد الآن نسبة من النجوم المفردة في درب التبانة هي أعلى كثيرًا مما نراه فعلًا. من الصعب جدًّا لمنظومة كهذه أن تقذف أزواجًا من النجوم ترتبط معًا في عناق جذبوي. الحقيقة أن التبخر الكامل لمنظومة بهذه «المرتبة المرتفعة» إلى منظومة ثنائية واحدة مع الكثير من النجوم المفردة يستغرق فقط ما يقرب من مائة ألف عام. حتى يكون هناك توافق مع الإحصائيات المرصودة، لا بد أن يحدث أن قلب السحابة المفرد يتشظى لينتج ما لا يزيد عن ثلاثة نجوم، وإن كان من الممكن أن تكون هناك أحيانًا استثناءات لهذه القاعدة.

ما يحدث هو أنه من بين كل مائة منظومة من النجوم المولودة حديثًا تكون هناك أربعون منظومة ثلاثية وستون ثنائية. ومن بين الأربعين الثلاثية يكون هناك خمس وعشرون لها حياة طويلة ومستقرة نسبيًّا، بينما هناك خمس عشرة تقذف في التو أحد نجومها لتعطي خمس عشرة ثنائية وخمسة عشر نجمًا مفردًا. يحدث هذا كله في منطقة لتكوين النجوم خلال ما يقرب من مائة ألف سنة، مخلفًا نسبة من خمس وعشرين ثلاثية إلى خمس وسبعين ثنائية إلى خمسة عشر نجمًا مفردًا. يحدث بعدها في مناطق ولادة النجوم، مثل ما يحدث الآن في سديم الجوزاء، مصادمات عن قرب بين النجوم تمزق المزيد من الأزواج الثنائية، فتزيد نسبة النجوم المفردة في المجرة عمومًا. بما أن كل ثنائية تتمزق ينتج عنها نجمان مفردان، فإن عشرة تمزقات لا غير من هذا النوع بين المجموعات التي وصفناها ستغير النسب إلى ٢٥:٦٥:٣٥، بما يجعل النجوم المفردة أكثر شيوعًا من الثلاثية.

حتى مع ذلك، سنجد إلى حد بعيد أن معظم النجوم التي نراها فيما حولنا الآن تكون أعضاء في منظومات من التعدد، وقد يبدو للوهلة الأولى أن من الغريب نوعًا أن تكون شمسنا أحد نجوم الأقلية المفردة. على أن من الممكن أن يكون هذا مثلًا آخر من أن نظرتنا للكون تتحيز بوجودنا نفسه. يبدو من الأرجح أن نوع الأقراص الغبارية من المادة التي يمكن أن تتشكل منها كواكب مثل الأرض، يكون موجودًا حول نجوم منعزلة. منظومات النجوم الثنائية أو الثلاثية نجد فيها أن التأثير الجذبوي للعضو الآخر (أو الأعضاء الآخرين) في المنظومة سيؤدي إلى تأثيرات من المد والجزر

تمزق الأقراص، وحتى لو تكوّنت بالفعل أي كواكب فإنها قد تنتهي إلى أن تكون في مدارات متطرفة حيث تتعرض بالتناوب إلى أن تسخن وأن تتجمد، أو تتم مقايضتها ما بين نجوم المنظومة. أشكال الحياة مثلنا لا يمكن أن توجد إلا فوق كواكب مستقرة طويلة الحياة في مدار حول نجوم مستقرة طويلة الحياة، من هذا المنظور للمبدأ الإنساني، لن يكون مما يثير الدهشة أن نجد أن شمسنا نجم وحيد جوال خلال الفضاء. على أنه أيًّا كان السبب، فإن الأمر يعني بالفعل أنه لا يلزم أن نحس بقلق من الصعوبات التي تسببها الرفقة المجاورة عندما نحاول أن نفهم لا غير الطريقة التي تكونت بها كواكب المنظومة الشمسية.

الملامح الرئيسية لأحد الكواكب هي أن حجمه أصغر من أن يسخن بالدرجة الكافية لأن «يحرق» وقودًا نوويًّا بالاندماج، وأنه يدور حول نجم. على أن هذا لا يزال يترك مجالًا للنظر في أمر احتمالات كثيرة. في وسعنا أن نضيق من مجال البحث بأن نقصر بحثنا على الكواكب التي تماثل حقًّا الأرض. يوجد في المنظومة الشمسية نفسها أربعة كواكب من هذا النوع الصغير الصخري، وهي الكواكب الأقرب إلى الشمس وتعرف بأسماء عطارد، والزهرة، والأرض، والمريخ. هناك أيضًا أربعة كواكب كبيرة غازية تدور في مدارات أبعد حول الشمس — المشتري، وزحل، وأورانوس، ونبتون. هناك بالإضافة إلى ذلك قطع مختلفة من دبش كوني، معظمها كتل من الثلج أو الصخر، إحدى هذه الكتل هي بلوتو، ويصنف عمومًا ككوكب لأسباب تاريخية. على أن التمييز الذي نود مناقشته هنا هو التمييز بين الكواكب الصخرية («الأرضوية») وبين العمالقة الغازية («المشتروية»).

كان من الشائع الاعتقاد بأن كلا النوعين من الكواكب تتكون بالطريقة نفسها، بتراكم أجزاء أصغر من المادة في القرص الموجود حول نجم صغير السن — وكثيرًا ما يطلق على ذلك أنه سيناريو «من أسفل إلى أعلى». في حالة كل من الكواكب الكبرى والصغرى، يكون أول جرم يتكون هو قلب صخري. وهذا تقريبًا هو مدى ما يمكن أن تجرى به الأمور بالنسبة للكواكب الداخلية، وذلك لأن حرارة النجم الصغير السن سوف تنفخ معظم الغاز بعيدًا إلى المناطق الخارجية من المنظومة الكواكبية التي لا تزال في

مرحلة التكوين. على أنه في مدار المشتري مثلًا، نجد أن الكتلة الصخرية التي ربما يكون لها كتلة مقدارها اثنتي عشرة مرة مثل كتلة الأرض، ستكون قادرة على أن تراكم غازًا ومادة ثلجية بواسطة الجاذبية، لتتنامى إلى الحجم الحالي.

على أن العقبة الكبيرة في هذا السيناريو هي أن الكواكب الغازية العملاقة سوف تستغرق ملايين كثيرة من السنين لتنمو بهذه الطريقة — في الحقيقة لو أن أورانوس ونبتون تناميا في مداريهما الحاليين، لوجدنا أن أبسط شكل من عملية «من أسفل إلى أعلى» سوف يستغرق زمنًا أطول من العمر الحالي للمنظومة الشمسية ليتم بناؤهما في حجميهما الحاليين. لم يكن هذا مهمًا إلى درجة كبيرة وقت أن كانت المنظومة الكوكبية الوحيدة التي نعرفها هي منظومتنا الشمسية، وعندما كان علماء الفلك ما زالوا يأملون العثور على نسخة أخرى لسيناريو «من أسفل إلى أعلى» ليحلوا هذا التناقض. إلا أنهم وجدوا أثناء السنوات القليلة الماضية ما يزيد بما له قدره عن مائة منظومة كوكبية أخرى. حدث في كل حالة تقريبًا أن الكوكب الذي يدور حول نجم يتم اكتشافه بسبب تأثيره الجذبوي على النجم، مما يجعل النجم يتذبذب جيئة وذهابًا أثناء دوران الكوكب من حوله. الذبذبة أصغر كثيرًا من أن يتم رصدها مباشرة، ولكنها تظهر من خلال تأثير ظاهرة دوبلر في طيف النجم. الملمح الذي أثار الدهشة أولًا في هذه الاكتشافات هو أن الكواكب التي اكتشفت بهذه الطريقة كواكب كبيرة من نوع المشتري تدور حول النجوم في مدارات قريبة من النجم الأب لها قربًا أكبر كثيرًا من قرب المشتري للشمس.

لا يدهشنا، بأحد المعاني، أن هذه الاكتشافات المبكرة للكواكب خارج المنظومة الشمسية (الكواكب خارج الشمسية، أو «الكواكب الخارجية») يغلب عليها وجود أجرام من هذا النوع، وذلك لأن الكواكب الكبيرة التي تدور في مدارات قريبة يكون لها أكبر التأثير في نجومها الآباء وهي الأسهل في العثور عليها باستخدام هذه الطريقة. استطاع علماء الفلك أخيرًا في ٢٠٠٥ أن يسجلوا أنهم قد كشفوا عن ضوء تحت الأحمر يأتي مباشرة من القليل من هذه الكواكب، بما يدل على أن لها درجة حرارة تقرب من ٨٠٠°

سلسيوس – وهذا أول ضوء يُرى آتيًا من أي كواكب خارج النظام الشمسي. بعد ذلك بقليل في السنة نفسها صور علماء الفلك فوتوغرافيًّا كوكبًا خارجيًّا آخر يدور حول نجم على مسافة ١٠٠ فرسخ نجمي (٢٢٥ سنة ضوئية) بعيدًا في كوكبة الشجاع Hydra على مسافة ٨ مليارات كيلومتر (أي مسافة قدرها ٥٤ مثلًا لمسافة الأرض من الشمس). على أن هذا الكوكب هو مرة أخرى كوكب عملاق، كتلته تقرب من خمسة أمثال كتلة المشتري. أصغر كوكب خارجي اكتشف حتى الآن له كتلة مقدارها على الأقل ستة أمثال كتلة الأرض ويدور في نشاط حول نجمه الأب جليز ٨٧٦، مرة كل ١,٩٤ يوم، ومن ثم فإن من الصعب أن يعد «شبيها بالأرض». إذا كان هناك كواكب تدور في مدارات حول نجوم أخرى تشبه مدار الأرض، فإن هذه الكواكب ستحتاج للعثور عليها إلى الجيل التالي من أجهزة الرصد. من حيث وجود كواكب خارجية، ليست المفاجأة هي أننا عثرنا على كواكب ساخنة من نوع المشتري، وإنما المفاجأة هي أنها موجودة. وإذا فما هو سبب وجودها؟

أحد التفسيرات الطبيعية هو أن الكواكب الغازية العملاقة لا تتشكل بالنمو بالتراكم بواسطة سيناريو من أسفل إلى أعلى، وإنما يحدث ذلك بسيناريو هو من أعلى إلى أسفل، كتكتلات غير مستقرة في القرص الأصلي للمادة حول النجم الصغير السن. يمكن لهذه التكتلات أن تتكون في أي مكان من القرص، سواء بالقرب من النجم أو بعيدًا عنه إلى الخارج، ويمكن للتفاعلات بين الكواكب والقرص أن تغير من مدارات العمالقة، بحيث إنها تتحرك إلى الداخل أو الخارج من المدارات التي تشكلت فيها. هذه «الهجرة» يمكن أن تفسر الطريقة التي وصل بها أورانوس ونبتون إلى أن يوجدا حيث هما الآن، إذ إنهما تكوّنا سريعًا إلى حد ما وهما على مسافة أقرب كثيرًا إلى الشمس في وقت تال مباشرة لوقت تكوّن الشمس نفسها. تطرح المحاكيات أن سيناريو من أعلى إلى أسفل ربما يستغرق فحسب مئات قليلة من السنين ليشكل كواكب الغاز العملاقة.

لا تزال هذه الأفكار نفسها في مرحلة التطوير، وقد حدث في ٢٠٠٥ أن أفراد فريق دولي من الباحثين من البرازيل، وفرنسا، والولايات المتحدة، اجتمعوا للتشاور معًا للتوصل إلى ما يكون حتى الآن أفضل محاكاة تفصيلية

لما حدث عندما كانت المنظومة الشمسية صغيرة السن. كانت نقطة انطلاقهم هي ما عُرف من الأدلة، بعد بعثات أبوللو في أواخر ستينيات القرن العشرين وأوائل سبعينياته وهي البعثات التي عادت بعينات من القمر، ودلت على أن الكثير من الملامح القاتمة التي نراها على وجه القمر نتجت عن مرحلة من قذفه الشديد بأنقاض من الفضاء عندما كان عمر المنظومة الشمسية يقرب من ٧٠٠ مليون سنة، في بعض وقت بعد تكوين الكواكب الداخلية. يعرف هذا الوقت بأنه زمن القذف الشديد المتأخر. عند الجمع بين هذا وبين الفهم الجديد لطريقة تكوين الكواكب العملاقة، وجد الفريق أن الكواكب العملاقة الأربعة لا بد أنها كلها قد تكونت وهي على قرب وثيق أحدها من الآخر ومحاطة بكتلة من أجرام صغيرة، تكتلات من الثلج والصخر تعرف باسم «المصغرات الكوكبية».[٩] لا يزال هناك وراء مدار الكواكب الموجود في أقصى الخارج قرص من المصغرات الكوكبية قد تخلف عن المراحل المبكرة من تكوين المنظومة الشمسية، بقايا هذا القرص تعرف باسم حزام كوبر، ولا تزال موجودة إلى الآن (هناك ما يسمى «بالكوكب العاشر» وهو كتلة كبيرة بوجه خاص من الأنقاض في حزام كوبر). على أنه إذا كانت الدراسات الحديثة صحيحة، فإن حزام كوبر الموجود حاليًا هو في الحقيقة مجرد بقية من مجده الماضي. كنتيجة للتفاعلات الجذبوية، تحرك المشتري ببطء مقتربًا من الشمس في حين تحركت العمالقة الثلاثة الأخرى بعيدًا إلى الخارج، وتتبعثر بعض المصغرات الكوكبية مشتتة بالطريقة نفسها، فبعضها يتجه مقتربًا من الشمس والبعض يتجه بعيدًا عنها.

تجرى هذه العملية في أول الأمر تدريجيًا. إلا أنه بعد مرور ٧٠٠ مليون سنة على تكوين المنظومة الشمسية، يحدث تغير درامي إذ يمر زحل خلال مدار حول الشمس ويستغرق فترة زمنية هي بالضبط ضعف طول فترة مدار المشتري حول الشمس. ينتج عن هذا توليف إيقاعي للشد الجذبوي بواسطة هذين الكوكبين يؤثر في الأجرام الأخرى في الجزء الخارجي من المنظومة الشمسية، نوع من تعاظم لتردد الأصداء مثل ما يحدث عندما

[٩] مصغرات كوكبية: وحدات صغيرة تُمتص في الكواكب أثناء تكوينها. (المترجم)

يكون أحد الأطفال فوق أرجوحة ويدفعها إلى أعلى وأعلى بحركات صغيرة ولكنها تُوقت بعناية. النتيجة النهائية لهذه العملية هي قذف أورانوس ونبتون خارجًا لينتهيا إلى مداريهما الحاليين، حيث يتضاعف فجأة نصف قطر مدار نبتون، بما يرسله إلى الخارج عند الجزء الداخلي من حزام كوبر ليبعثر أعدادًا هائلة من المصغرات الكوكبية لتصل إلى الجزء الداخلي من المنظومة الشمسية — لا بد أن يوجد توازن بين ما يذهب إلى الخارج وبين ما يذهب إلى الداخل، بما يتفق مع مبدأ نيوتن المشهور «لكل فعل رد فعل مضاد يساويه». هذا الفيض من المصغرات الكوكبية هو الذي أدى إلى الندوب على سطح القمر، وفيما يفترض أدى أيضًا على ندوب الأرض والكواكب الأخرى، وإن كان أثر الندوب هنا أقل وضوحًا لأن سطح كوكبنا قد أعيد تشكيله بواسطة تكتونيات[١٠] الألواح (الانجراف القاري)[١١] والتآكل.

اكتسب هذا الفرض قوة فيما بعد في ٢٠٠٥ عندما تم تحليل الأنقاض التي تبعثرت في الفضاء نتيجة اصطدام «مسبار ناسا للارتطام العميق» مع مذنب تمبل-١ Tempel-I وأظهر التحليل أن تركيب مادة المذنب (خاصة من حيث كمية الإيثان) يناظر نوع الكيمياء التي كانت ستحدث في أجرام كهذه عندما تتكون في منطقة المنظومة الشمسية التي يشغلها الآن أورانوس ونبتون. يبدو أن تمبل-١ هو إحدى القطع الآتية من هذا الحزام المبكر من المذنبات التي بعثرت إلى الخارج في أعماق الفضاء بواسطة هجرة أوراونوس ونبتون.

هكذا تتلاءم كل الأجزاء معًا تلاؤمًا رائعًا، وهذا يترك لعملية السيناريو البطيء بطريقة من أسفل إلى أعلى أن يكون فيها التفسير لتكوين الكواكب، وخاصة تكوين الأرض نفسها، وذلك عبر فترة أطول كثيرًا في منظومة شمسية تكون فيها الكواكب العملاقة موجودة من قبل، هذا هو الموضع الذي تأتي فيه المصغرات الكوكبية حقًا إلى القصة. إذا تركنا الآن العمالقة

---

[١٠] تكتونيات الألواح: حركات في علاقات بينية تجرى في الألواح الصلبة أو المقاطع التي تصنع القشرة الأرضية وهي قشرة مركبة على صخر داخلي نصف مصهور، وهذه الحركات قد تسبب الزلازل. (المترجم)

[١١] انجراف القارات: نظريات بانجراف كتل الأرض لتتباعد في بطء، كما في تكوين قارات العالم الحالية من كتلة واحدة أصلية. نظرية انجراف القارات مدعومة الآن بنظرية تكتونيات الألواح. (المترجم)

الغازية خارج الصورة، نستطيع أن نلتقط قصة طريقة تكوين الكواكب مثل الأرض منذ الوقت الذي كانت الشمس فيه محاطة بقرص غباري من المادة. افترض علماء الفلك قبل تسعينيات القرن العشرين أن الكواكب الأرضوية لا بد أنها تكونت من قرص كهذا، إلا أنهم لم يكن لديهم أدلة مباشرة على أن الأقراص الغبارية توجد بالفعل حول النجوم الصغيرة السن. على أنه بعد ذلك الوقت، في أعقاب اكتشافات خارقة بواسطة تلسكوب هابل الفضائي، أخذت تكنيكات الأرصاد التي تتحسن في الكشف عن أقراص ضخمة من المادة (تعرف الآن بأنها أقراص كوكبية أولية) توجد حول الكثير من النجوم الصغيرة السن في جيرتنا. من الواضح أن هذه الأقراص ملمح مهم في طريقة تكوين النجوم. بما أن هذه الأقراص لا تشاهد حول النجوم الأكبر سنًا، فإن من الواضح أيضًا أنها إما قد انتثرت مشتتة، أو أنها قد تحولت إلى شيء آخر — إلى كواكب.

هذه الأقراص ضخمة حقًا. إحدى وحدات القياس التي يستخدمها علماء الفلك تسمى الوحدة الفلكية، وهي تقابل متوسط المسافة بين الأرض والشمس (تقريبًا ١٥٠ مليون كيلومتر). أفضل ما جرى من الدراسات للأقراص الكوكبية الأولية دراسة لقرص يقع حول نجم يسمى بيتا بيكتوريس ويمتد عبر قطر طوله ١٥٠٠ وحدة فلكية (ما يقرب من ٢٢٥ مليار كيلومتر). منظومة بيتا بيكتوريس يُقدر عمرها بما يقرب من ٢٠٠ مليون سنة، وتبلغ كتلة المادة في القرص ما يقرب من مثل ونصف المثل لكتلة شمسنا. معظم هذه المادة سيفقدها القرص أثناء وصوله للاستقرار. يمكننا أن نرى هذه العملية وهي تحدث في بعض الحالات، حيث تشاهد أيضًا نوافير من المادة، تنبجس متعامدة على القرص وهي تخرج من قطبي النجم الصغير السن في قلب المنظومة، قد تمتد هذه النوافير مسافة تصل إلى ألف وحدة فلكية (١٥٠ مليار كيلومتر) ويمكن رؤيتها في الضوء تحت الأحمر. نجد من باب المقارنة أن نصف قطر مدار نبتون، عملاق منظومتنا الشمسية الموجود في آخرها، هو فحسب ٣٠ وحدة فلكية. نجد على نحو له مغزاه أن الجزء الداخلي من منظومة بيتا بيكتوريس يبلغ عرضه عشرات قليلة من الوحدات الفلكية، وهو منبعج ومشوه بالطريقة نفسها التي نتوقعها إذا كانت هناك

كواكب تدور من داخله. في حالات أخرى توجد بالفعل فجوات في المناطق الداخلية من الأقراص، عرضها يماثل تقريبًا عرض منظومتنا الشمسية، بما يطرح أن المادة هناك قد جرفت بالفعل إلى كواكب.

وجد تلسكوب هابل الفضائي وحده المئات من أقراص الكواكب الأولية، على أننا سنذكر فقط قلة منها لنبين ما يدل على نوع الظروف التي لا بد أنها وجدت عندما كانت منظومتنا الشمسية صغيرة السن. عمومًا فإن أعمار النجوم التي ما زالت تحوز أقراصًا كهذه تتراوح من عشرات قليلة من ملايين السنين إلى مئات قليلة من الملايين، وتوضح دراسات تحليل الطيف أن لها تركيبًا مماثلًا لشمسنا (مع استبعاد الهيدروجين والهيليوم من ذلك والتركيز على «المعادن»). هناك خصائص أخرى للإشعاع من الأقراص تكشف عن أنها ليست غبار «دخان السجائر» الأصلي الذي يشاهَد في سحب ما بين النجوم، وإنما هي قد مرت بطريقة معالجة أخرى، ويفترض أنها تشكلت في مصغرات كوكبية تصادمت بعدها فيما بينها وتكسرت لتشكل «جيلًا ثانيًا» من الغبار. الأشعة تحت الحمراء التي تخرج من بعض المنظومات (بما في ذلك قرص حول فيجا «النسر» والمعروف أيضًا بالفاليري، ألمع نجم في كوكبة القيثارة) تبين أن حجم حبيبات الغبار يقرب من ١٠ ميكرونات (عشرة أجزاء من المليون من المتر). كتلة الغبار نفسها هي بالطبع أقل كثيرًا من كتلة القرص كله، بسبب وجود قدر كبير من غاز الهيدروجين الذي يُفقد باطراد في الفضاء. بالنسبة «لبيتا بيكتوريس»، يبدو أن هناك ما يقرب من مائة مثل لكتلة الأرض في شكل غبار.

أكثر الأرصاد إثارة لأقراص الكواكب الأولية هي تلك التي تطرح وجود كواكب في الأقراص. ذكرنا فيما سبق أن بعض الأقراص تكون منبعجة بالطريقة التي يؤدي بها وجود كواكب إلى الانبعاج وبعضها فيه فجوات بالحجم المناسب بالضبط الذي يتلاءم لأن توجد به منظومة مثل منظومتنا الشمسية. إحدى أسهل ما أتيح لنا دراسته من المنظومات من هذا النوع هي منظومة القرص المحيط بالنجم الصغير السن المسمى فم الحوت Fomalhaut، ويقرب عمره من ٢٠٠ مليون سنة وله كتلة مقدارها تقريبًا ضعف كتلة شمسنا. وهو يميل عن خط الرؤية من الأرض، مما

يجعله يصلح مباشرة لدراسة الطريقة التي يكون بها النجم «المركزي» غير مركزي على الإطلاق، وإنما هو قد أُزيح إلى جانب من القرص، الأمر الذي يطرح تأثيرًا جذبويًا من كواكب كبيرة عديدة. نجم «فم الحوت» لا يبعد عنا إلا بمسافة ٧,٧ من الفراسخ (٢٥ سنة ضوئية)، مما يسهل دراسة المنظومة باستخدام أجهزة مثل تلسكوب هابل الفضائي. عمومًا يوجد داخل القرص الغباري حزام محدد بوضوح بالغ، أو هو حلقة، يبلغ عرضها ٢٥ وحدة فلكية (٢٥ مثلًا للمسافة من الأرض إلى الشمس) وطول قطرها ٢٦٦ وحدة فلكية، بالقياس من حرفه الداخلي المحدد بوضوح. هذا القطر يساوي تسعة أمثال قطر مدار نبتون، أقصى كوكب خارجي كبير في منظومتنا الشمسية. مركز الحلقة مزاح بخمس عشرة وحدة فلكية عن موقع نجم فم الحوت نفسه — وهذه إزاحة بمسافة ٢,٢٥ مليار من الكيلومترات، بما يساوي النصف من نصف قطر مدار نبتون. يصعب أن يكون هذا نتيجة أي تأثير رهيف. إزاحة الحلقة وحرفها الداخلي الواضح بدقة ينبئان أن هناك كواكب تدور على قرب وثيق من النجم وتجرف المادة من القرص، الحلقة نفسها ربما تمثل المراحل المبكرة لتشكيل حزام لفم الحوت يماثل حزام كوبر للمنظومة الشمسية، خزان المادة الثلجية المتخلفة عن تشكيل منظومتنا الكوكبية.

إحدى الإشارات الأخرى لوجود الكواكب تتأتي من حقيقة أنه يبدو أن كل الغبار في هذه الأقراص يكون نسبيًا باردًا. لا بد أن الاحتكاك في القرص سيؤدي حتمًا إلى انجراف بعض حبيبات الغبار إلى الداخل تجاه الكوكب المركزي، حيث ينبغي أن تغدو ساخنة وتشع بما يتفق مع ذلك. حقيقة أن هذا الغبار لا يُرى تدل على أنه في بعض الحالات (مثل حالة «الفاليري») هناك شيء يلتهم الحبيبات وهي تنجرف إلى الداخل. من الصعب ألا ندرك أن هذا «الشيء» لا بد أن يكون كواكب.

بالنسبة لبيتا بيكتوريس، النمط النموذج لهذه المنظومات، يمكن تفسير انبعاج القرص بوجود جرم يدور حول النجم المركزي على مسافة تتراوح بين وحدة فلكية واحدة وعشرين وحدة، وله كتلة تتراوح بين ستة آلاف مثل وستة أمثال كتلة الأرض. بالإضافة إلى ذلك، فإن سمك هذا القرص بالذات

يطرح أنه لا بد أن هناك أجرامًا صلبة عرضها على الأقل ألف من الكيلومترات تدور من داخله وتثير فيه اضطرابًا، وإلا لكان قد استقر في تشكيل بسمك أرفع كثيرًا، أقرب شبهًا بحلقات زحل. هناك تلسكوب سيخلف تلسكوب هابل الفضائي (يسمى أحيانًا التلسكوب الفضائي من الجيل التالي، وإن كان اسمه الرسمي هو تلسكوب جيمس ويب الفضائي، وقد تحدد لإطلاقه عام ٢٠١١)، وينبغي أن يكون هذا التلسكوب قادرًا على الكشف عن الفجوات الموجودة في القرص التي جرفتها إلى الخارج كواكب مثل المشتري. إلا أن هذا سيكون فحسب مثل رش السكر فوق الكعكة، لأننا نعرف من قبل أن الكواكب من نوع المشتري موجودة ونعرف من قبل أن أقراص الكواكب الأولية موجودة. نحن نعرف أيضًا أن المصغرات الكوكبية موجودة في هذه الأقراص الغبارية، لأن الخصائص الطيفية لحبيبات الغبار توضح أنها ثاني جيل من الجسيمات. من السهل أن ندرك كيف أن مجموعة من الصخور الثلجية تستطيع أن تنشد معًا بالجاذبية لتشكل كوكبًا كالأرض. وهكذا فإن السؤال عن طريقة تكوين كواكب مثل الأرض يُختصر إلى السؤال في المقام الأول عن الطريقة التي تلتصق بها معًا جسيمات الغبار التي في حجم دخان السيجارة والموجودة في السحب ما بين النجوم لتصنع المصغرات الكوكبية.

الكلمة الحاسمة هنا هي «تلتصق». عندما تصطدم معًا حبيبات الغبار الضئيلة التي تدور في فراغ الفضاء (أو ما يقرب من الفراغ)، فإنها تنحو لأن ترتد متواثبة، وليس لأن تلتصق معًا. حتى وقت قريب، كان علماء الفلك يحاجون بحجج هي إلى حد بعيد من نوع التفكير بالتمني، ويطرحون على نحو غامض أن حبيبات الغبار قد تلتصق إحداها بالأخرى إذا زحفت الواحدة خلف الأخرى في مدار قريب جدًّا من أن يكون المدار نفسه، لتتصادم فيه فحسب تصادمًا لطيفًا. إلا أن هناك عاملًا آخر يجب أن يوضع في الحسبان. الماء هو أحد أكثر المركبات التي يرجح وجودها في السحابة الجزيئية التي تتكون منها المنظومة الكوكبية. الهيدروجين هو العنصر الأكثر شيوعًا على نحو غامر، والأكسجين وإن كان أقل شيوعًا بكثير عن الهيدروجين، فإنه «المعدن» الأكثر وفرة، وهو ثالث العناصر شيوعًا بعد الهيدروجين والهيليوم. بما أن الهيدروجين والأكسجين يتحدان بلهفة أحدهما مع الآخر لصنع الماء،

فلا بد أن يكون هناك بخار ماء كثير في السحابة التي تتكون منها الكواكب. إلا أنه لا يوجد أي ماء سائل. في الفضاء الذي يقرب من الفراغ، حيث حبيبات الغبار بحجم الميكرون لا تزيد حرارتها عن عشرات قليلة من درجات كلفن، يتكثف بخار الماء مباشرة على الحبيبات كثلج. جرت دراسات في المعامل فوق الأرض حيث يمكن محاكاة هذه الظروف وبينت أنه عندما يحدث ذلك، فإن جزيئات الماء بما لها من شحنة موجبة عند طرف وشحنة سالبة عند الطرف الآخر، تصطف بحيث يكون كل غلاف الثلج حول الحبيبة مستقطبًا كهربائيًّا. ينتج عن ذلك قوى كهربائية تستطيع أن تجعل الحبيبات الثلجية تلتصق معًا مثل قضبان المغناطيسات الدقيقة التي نجدها في بعض الدمى فوق مكاتب كبار التنفيذيين.

لا بد أن هذا الثلج يختلف كذلك بطريقة أخرى عن الثلج الذي نضعه في مشروباتنا. كنتيجة لأن هذا الثلج يتكثف مباشرة من حالة البخار فوق الحبيبات الدقيقة، فإنه يشكل بنية تشبه رقائق الجليد أكثر من مكعبات الثلج. ومن ثم، فإن كل حبيبة ضئيلة من المادة الصلبة (وهي معظمها مركبات كربون وسيليكون) ستكون محاطة بطبقة خارجية زغبية تعمل على امتصاص الصدمات، فتكون بمثابة الوسادة عندما تصطدم الحبيبات إحداها بالأخرى. عندما تقع الاصطدامات تقلل الزغب الثلجية من قوة أي ارتداد متوثب، وتكون القوى الكهربائية كافية لأداء باقي المهمة. أُجريت اختبارات في «المعمل القومي لشمال غرب المحيط الهادي» في واشنطن، استخدمت فيها كرات من خزف صلب دقيقة الحجم (قطرها جزء من ستة عشر من البوصة أو ٠٫٢ سم) أسقطت فوق ثلج عادي في حجيرة مفرغة، فارتدت متواثبة بارتفاع يصل إلى ٤٨ في المائة من الارتفاع الذي أسقطت منه، إلا أن الكرات نفسها عندما أسقطت فوق ثلج ترسب من بخار الماء عند درجة حرارة ٤٠ كلفن، ارتدت بارتفاع مقداره فقط ٨ في المائة من الارتفاع الأصلي لإسقاطها.

ظاهرة «الثلج ذي الزغب» تصلح بوجه خاص لتنمية المصغرات الكوكبية في الأجزاء الخارجية الأبرد في المنظومة الكوكبية الصغيرة السن حيث تُشاهَد الآن أقراص الكواكب الأولية. المناطق الداخلية الأكثر سخونة

حيث تتكون الكواكب مثل الأرض، قد تحدث فيها ظواهر كهربائية مماثلة تتناول حبيبات سيليكات. في أي من الحالين، ما إن تتنامى الحبيبات الأصلية إلى حجم متواضع حتى تبدأ في أن تجذب إحداها الأخرى بالشد الجذبوي، لتبني أجرامًا عرضها كيلومتر واحد أو أكثر خلال ما يقرب من مائة ألف سنة. الاصطدامات بين هذه الأجرام (وبين ما هو أكبر) هي التي ينتج عنها الجيل التالي من الغبار الذي يشاهَد في أقراص الكواكب الأولية.

بناء كواكب صخرية مثل الأرض من مصغرات كوكبية عرضها كيلومتر واحد أو أكثر بمساعدة الجاذبية أمر يستغرق زمنًا — ربما يطول إلى ٥٠ مليون سنة، ولكن هذا مجرد زمن لطرفة عين بالمقارنة بعمر المنظومة الشمسية. لا يوجد إلا أقل الأسرار حول هذه المرحلة من العملية، ولا توجد حاجة إلى التوسع هنا بشأنها. ولكنها تقودنا بالفعل إلى أكبر الأسرار مطلقًا — كيف انبثقت الحياة فوق الأرض، وهل هناك حياة في مكان آخر في الكون؟

الفصل التاسع

ما هو أصل الحياة؟

كل واحد منا يعرف ما هي الحياة، إلا أنه لا يوجد أي قاموس أو كتاب دراسي فيه تعريف «للحياة» يرضي إرضاء كاملًا. هناك تعريف إجرائي كافٍ لأغراضنا الحالية في هذا الكتاب، يؤكد على أن الحياة تتضمن استخدام الطاقة المستمدة من البيئة المحيطة لبناء جزيئات معقدة، وللنمو، والتكاثر. «تتغذى» الحياة دائمًا من مصدر طاقة خارجية — في حالة الحياة فوق سطح الأرض يكون مصدر هذه الطاقة هو الشمس. إذا استخدمنا تعريفًا للحياة فيه دقة أكثر قليلًا فسنجد أنه يؤكد أيضًا على أن الحياة دائمًا مصحوبة بمنظومات أبعد من أن تكون متوازنة كيميائيًّا. وكمثل، فإنه نتيجة لعمليات الحياة يكون جو الأرض ثريًّا بالأكسجين، وهو غاز يتفاعل بنشاط كبير. ليس هذا مما يمثل توازنًا كيميائيًّا. لو لم تكن هناك حياة على الأرض، لانحبس الأكسجين سريعًا في جزيئات مستقرة مثل ثاني أكسيد الكربون.[1] لدى جارنا كوكب الزهرة (توازن) مستقر في جوه الغني بثاني أكسيد الكربون، وهذه الحقيقة فيها دليل يفرض نفسه بقوة على أن هذا الكوكب ليس فيه حياة.

كان من المعتقد حتى وقت قريب أن كل الخطوات اللازمة لانبثاق الحياة قد وقعت أساسًا فوق الأرض، في زمن حل سريعًا بعد تكوين كوكبنا. على أنه أصبح من الواضح الآن أن الخطوة الأولى على الأقل — أي خطوة استخلاص الطاقة من البيئة المحيطة لبناء جزيئات معقدة — هي خطوة

[1] ناقشت هذه الأمور الدقيقة البارعة هي وغيرها في كتابي «البساطة العميقة»، على أننا لن نتوسع فيها هنا.

قد وقعت، ولا تزال تقع، في سحب الغبار والغاز حيث تتكون النجوم. الجزيئات في الفضاء، مثلها مثل الذرات التي توجد في الطبقات الخارجية لأحد النجوم، يمكن تعيينها بتحليل الطيف. إلا أن هناك فارقًا أساسيًا في أنه بدلًا من تعيينها عن طريق خطوط تنتج في طيف الضوء المرئي، فإن الجزيئات المعقدة بسبب حجمها الأكبر، يتم تعيينها عن طريق إشعاعها المتميز بخصائصه عند الأمواج الأكثر طولًا، أي عند أطوال الموجات تحت الحمراء وموجات الراديو. تأخر اكتشاف وجود هذه الجزيئات في الفضاء وكان هذا جزئيًا بسبب أن التكنولوجيا اللازمة للبحث عنها لم توجد إلا عند النصف الثاني من القرن العشرين، وجزئيًا بسبب أنه لم يكن هناك من يتوقع أنها موجودة هناك، ومن ثم لم يبحث عنها أحد.

أول جزيئات تم تعيينها في الفضاء قد اكتُشفت في زمن يرجع إلى ثلاثينيات القرن العشرين، لأنها كانت جزيئات يسهل الكشف عنها. ولكنها يصعب أن تُعد جزيئات معقدة — فهي اتحاد بسيط للكربون والهيدروجين (CH) ومركب للكربون والنيتروجين يعرف باسم شق السيانوجين (CN). لم يحدث إلا في ١٩٦٣ أن تم تعيين مركب آخر — شق الهيدروكسيل (OH) — على أن أول خطوة درامية إلى الأمام جاءت في ١٩٦٨، عندما تم اكتشاف انبعاث تبعثه النشادر، وهي جزيء من أربع ذرات (NH_3)، اكتشف أنه يأتي من اتجاه مركز مجرتنا. كان هذا الاكتشاف هو بداية دوران العجلة لتشجيع علماء الفلك للبحث عن جزيئات في الفضاء أكثر تعقدًا، كان هذا التشجيع ضروريًا لأنه في معظم الحالات كان على هؤلاء العلماء أن يقرروا أولًا ما الذي يبحثون عنه، ثم أن يقيسوا بعدها أطياف الجزيئات الملائمة في المعمل فوق الأرض، وذلك قبل أن يكون في الإمكان أن تتاح لهم الفرصة لتعيين أطياف الراديو التي يكشفون عنها آتية من مادة سحب ما بين النجوم. هكذا سرعان ما اكتشفوا الماء (H_2O)، ثم الجزيء الذي جعل الفرقة الموسيقية تبدأ العزف حقًا، وهو الجزيء العضوي الفورمالدهايد (H_2CO).

كان في هذه الاكتشافات ما جلب الراحة لعلماء البيولوجيا. أوضحت أدلة الحفريات أن الحياة (حياة كائنات الخلية الواحدة) قد وجدت بالفعل

فوق الأرض منذ ما يقرب من أربعة مليارات عام، أي بعد تكوين الأرض بأقل من مليار سنة. مرور مئات قليلة من ملايين السنين يبدو زمنًا أقصر إلى حد غير مريح من أن تتقدم فيه الكيمياء من أشياء بسيطة مثل ثاني أكسيد الكربون والنشادر إلى أشياء مثل البروتينات والدي إن إيه. على أنه إذا كانت الجزيئات العضوية المعقدة موجودة هنا وهناك منذ وقت أن برد كوكبنا، فإن سرعة انبثاق الحياة ستكون أقل إدهاشًا. في السنوات القليلة الماضية، عيّن علماء الفلك أيضًا هذه الأنواع من الجزيئات في مجرات أخرى، بما يبين أن وجودها في الفضاء ما بين النجوم هو بالمعنى الحرفي ظاهرة كونية، وليس ظاهرة تقتصر على مجرتنا درب التبانة.

المركبات العضوية كما يدل اسمها مركبات مصاحبة للحياة. كل ما يُسمى بالجزيئات العضوية تحوي ذرات كربون ترتبط كيميائيًّا بذرات هيدروجين وبذرات عناصر أخرى أيضًا في معظم الحالات. كان يُعتقد أصلًا في القرن التاسع عشر، أن هذه المركبات توجد حصريًّا في صحبة الحياة، ومن هنا كان اسمها، إلا أنه اتضح بعدها أن الكثير من الجزيئات العضوية يمكن تخليقها اصطناعيًّا بما يعبر عنه على سبيل المثال بأنه يحدث في أنبوبة الاختبار، ومنذ أن اتضح ذلك أصبح مصطلح «الكيمياء العضوية» مرادفًا تقريبًا لمصطلح «كيمياء الكربون». إلا أن هذا لا يعني أنه لا توجد صلة ارتباط بين الكيمياء العضوية والحياة؛ فعمليات الحياة كلها مصحوبة بالمركبات العضوية، وإن لم تكن كل المركبات العضوية مصحوبة بالحياة.

هناك سببان لأن يكون الكربون مهمًّا هكذا للحياة. أولهما أن كل ذرة كربون قادرة على أن تصنع في الوقت نفسه أربع صلات ارتباط (روابط) بالذرات الأخرى، بما في ذلك ذرات الكربون الأخرى. هذا هو أقصى عدد من الروابط يمكن أن تصنعه أي ذرة، وذلك باستثناء حالتين خاصتين غريبتين إلى حد ما، ومن ثم فإن الكربون له القدرة على صنع الكثير من الصلات مع ذرات أخرى، ويمكنه أن يقبع في القلب من مركب معقد يحوي ذرات كثيرة من عناصر مختلفة.[٢] السبب الآخر في أن الكربون بالغ الأهمية

---

[٢] هناك ذرات أخرى تستطيع كل منها أن تصنع أربع روابط كيميائية، خاصة السيليكون، إلا أن ما يوجد من ذرات الكربون يصل عدده إلى ثمانية أمثال عدد ذرات السيليكون، وعلى أي حال فإن الروابط التي يصنعها السيليكون أضعف مما يصنعه الكربون.

هو أنه شائع نسبيًّا. إذا استبعدنا الهيدروجين والهيليوم اللذين يصنعان القدر الأكبر من المادة الباريونية في الكون، فسنجد أن أكثر عنصر شائع هو الأكسجين، والعنصر الثاني في كثرة شيوعه هو الكربون، وكلاهما يتم إنتاجه بعملية من التركيب النووي في النجوم.

ونجد أن ذرات الكربون لا يلزم عليها أن تستخدم كل روابطها الأربع لترتبط بأربع ذرات أخرى. فذرات الكربون تستطيع أيضًا أن تكوّن رابطتين اثنتين (أو حتى ثلاث روابط)، بحيث يمكن مثلًا لذرتين من الكربون أن تستخدم كل منهما اثنتين من روابطها لترتبط كل منهما بالأخرى برابطة مزدوجة، بحيث يُترك لكل منهما رابطتان حرتان في إمكانهما الارتباط بذرات أخرى. تستطيع ذرات الكربون أيضًا أن تشكل سلاسل طويلة، حيث تتصل الواحدة بالأخرى مثل العمود الفقري، مع وجود ذرات أخرى ومجموعات من الذرات مرتبطة بالعمود على الجانبين، بل تستطيع ذرات الكربون أن تصنع حتى حلقات (ويكون ذلك غالبًا باستخدام ست ذرات كربون «تتماسك بالأيدي» في حلقة) مع وجود أشياء كيميائية أخرى مرتبطة هنا وهناك بمحيط الحلقة. الكربون إذن هو الأكثر شيوعًا والأكثر لهفة لصنع روابط كثيرة مع الذرات الأخرى. بالتبصر في الأحداث، يبدو محتمًا أن يوجد الكثير من مركبات الكربون — مركبات عضوية — في السحب ما بين النجوم وما حول النجوم، حيث تكون طاقة ضوء النجم متاحة لأن تدفع أمامًا بتفاعلات كيميائية مثيرة للاهتمام (بما في ذلك طاقة الإشعاع تحت الأحمر وفوق البنفسجي).

بحلول ٢٠٠٥ كان قد تم اكتشاف أكثر من ١٣٠ جزيئًا في الفضاء، معظمها في سحب الجزيئات الضخمة حيث تولد النجوم (والكواكب). تتراوح هذه الجزيئات ابتداء من جزيئات بسيطة من ذرتين مثل أوكسيد النيتريك (NO) وأول أكسيد السيليكون (SIO)، ومرورًا بأنواع جزيئات من ثلاث ذرات، بما في ذلك سيانيد الهيدروجين (HCN) وثاني أكسيد الكبريت (SO_2)، ثم النشادر ذات الذرات الأربع (NH_3)، والأسيتلين (HC_2H)، وحمض الفورميك (HCOOH)، وهو المكون النشط في لدغات النحل ونبات القراص اللاسع)، ووصولًا إلى الجزيئات العضوية الكبرى التي تهمنا هنا أساسًا. الحجم ليس

بكل شيء، وهناك واحد من أكبر الجزيئات التي تعينت حتى الآن على وجه أكيد في الفضاء ويتألف من سلسلة مملة نوعًا تتكون من إحدى عشرة ذرة كربون وذرة هيدروجين واحدة عند طرف وذرة نيتروجين واحدة عند الطرف الآخر، اسم هذا الجزيء هو سيانونيتاسيتلين وصيغته الكيميائية هي ($HC_{11}N$). عندما يتعلق الأمر بالحياة نجد أن التعقد له أهمية بمثل أهمية الحجم، وقد يكون الأمر أكثر إثارة وأهمية عندما نعين جزيئات قد تكون أصغر من ($HC_{11}N$) ولكنها تحوي تنوعًا أغنى من ذرات تنتظم بطرائق أكثر إثارة للاهتمام. لا ريب في أن الجزيئات التي نعتبرها مثيرة للاهتمام هي تلك التي تُستخدم لصنع وحدات بناء الحياة، نحن نستطيع أن نعين أي الجزيئات تكون من هذا النوع بأن ننظر في البنية التي اكتشفها علماء الكيمياء الحيوية عندما نظروا في هذه الجزيئات البيوكيميائية وهي منفصلة.

هناك نوعان من الجزيئات البيولوجية الكبيرة تشكل أساس الحياة على الأرض. إحدى العائلتين هي عائلة البروتينات، وهي توفر لنا بنية أجسادنا (بما في ذلك أشياء مثل الشعر والأظافر، وكذلك العضلات)، في حين أنه يوجد أيضًا بروتينات أخرى تسمى الإنزيمات، وهي تتحكم مباشرة في كيمياء أجسادنا. العائلة الثانية هي الأحماض النووية (بما في ذلك حمض الدي إن إيه المشهور أو حمض دي أوكسى ريبو نيوكلييك). وتحوي هذه الأحماض التعليمات المشفرة التي تخبر ماكينات الخلية بطريقة صنع أنواع البروتين المختلفة. يتشارك هذان النوعين من الجزيئات في ملمح مهم مشترك — فكلاهما مصنوع من سلاسل طويلة فيها وحدات جزيئية فرعية ترتبط معًا بروابط كيميائية لتوفر بنية تحوي الكثير من المعلومات. ونحن نعني بكلمة طويلة أنها تكون طويلة فعلًا — إذا قسنا ذلك بوزن ذرة الكربون الواحدة التي تزن اثنتي عشرة وحدة، فإن الأوزان الجزيئية للبروتينات تتراوح من آلاف قليلة من الوحدات إلى ملايين قليلة منها.

الوحدات الفرعية في البروتينات (بما في ذلك الإنزيمات) هي جزيئات تسمى الأحماض الأمينية. الأحماض الأمينية نفسها وزنها بالمقياس نفسه يكون أكثر قليلًا من مائة وحدة، وهذا يدلنا على مدى كثرة الأحماض

الأمينية التي يتطلبها صنع أحد البروتينات. على أنه يمكن إدراك أهمية هذه الجزيئات للحياة من حقيقة أن نصف كتلة المادة البيولوجية كلها فوق الأرض هي أحماض أمينية. الوحدة الكيميائية التي تعطي الأحماض الأمينية اسمها هي وحدة مبنية حول ذرة كربون واحدة. ترتبط إحدى الروابط الأربع لذرة الكربون بذرة واحدة من الهيدروجين، وترتبط رابطة أخرى بمجموعة من ثلاث ذرات مترابطة تعرف باسم المجموعة الأمينية (NH_2) ثم رابطة بمجموعة حمض الكربوكسيل،[٣] (COOH) — ومن هنا يأتي اسم «الحمض الأميني». الرابطة الرابعة تترك حرة لترتبط بذرة كربون أخرى هي نفسها لديها ثلاثة روابط أخرى يمكن أن ترتبط بأنواع شتى من المجموعات الأخرى.

من الواضح أن هناك مجالًا ضخمًا لوجود الأحماض الأمينية بتنوع هائل، وقد تم بالفعل إنتاج أنواع أحماض أمينية كثيرة جدًّا في المعمل. على أن كل البروتينات الموجودة في الكائنات الحية فوق الأرض مصنوعة من توليفات مختلفة من عشرين حمضًا أمينيًّا لا غير. حقيقة أن كل الأشياء الحية التي نعرفها تستخدم نفس الوحدات العشرين للبناء بالطريقة نفسها أساسًا هي دليل ظرفي على أن كل الحياة على الأرض تنبع من أصل واحد. لقد انحدرنا جميعًا من سلف واحد مشترك، وعلى الرغم من أننا لا يمكننا استبعاد الإمكان بأن شكلًا من أشكال الحياة المختلفة تمامًا ربما وجد أيضًا على الأرض منذ زمن بعيد، فإنه إذا كان هناك وجود له فإنه لم يخلف أي أثر أو أي سلالة. لا شك أن البروتينات هي جزيئات الحياة، حتى وإن كان لا يمكننا أن نقول إن جزيء البروتين المنعزل شيء «حي». نحن لا نجد البروتينات قابعة هنا وهناك في العالم، وقد نتجت عن كيمياء غير حية، فنحن لا نجدها إلا مصاحبة للأشياء الحية. ولكننا نعثر بالفعل على أحماض أمينية تقبع هنا وهناك في العالم، سواء تلك التي لها أهميتها للحياة أو بعض تلك الأحماض التي لا تستفيد منها الحياة. بهذا المعنى فإن الأحماض الأمينية لا حية. الحيلة التي تحوّل اللاحياة إلى حياة (أيًّا ما

[٣] مجموعة الكربوكسيل مجموعة مميزة للأحماض العضوية. (المترجم)

تكونه الحياة) يبدو أنها حيلة توجد في مكان ما في العملية التي تصنع البروتينات من الأحماض الأمينية. وهذه الحيلة ينبغي أن تكون مصحوبة بتعقد البروتينات بالمقارنة بالأحماض الأمينية — وذلك بمقدار المعلومات الذي تحمله.

ينطبق هذا على السلاسل الطويلة التي تصنع البروتينات في شعرنا وعضلاتنا وغير ذلك من الملامح البنيوية للجسم، كما ينطبق أيضًا على البروتينات التي تلتف فيها السلاسل في كرات صغيرة، أو ما يسمى بالبروتينات الكروية التي تعمل كإنزيمات، تشجع بعض التفاعلات الكيميائية المهمة للحياة وتحبط تفاعلات كيميائية أخرى فيها ضرر للحياة. يسهل علينا بوجه خاص أن ندرك مفهوم اختزان المعلومات في أحد البروتينات في صيغة شفرة تتمثل في ترتيب الأحماض الأمينية بطول سلسلة البروتين، وذلك لأن عدد الأحماض الأمينية المتاحة لأن تستعملها الماكينة البيولوجية بهذه الطريقة هو عشرون حمضًا، وهو عدد قريب جدًّا من عدد الحروف في الأبجدية الإنجليزية، وهو عدد من ستة وعشرين حرفًا. لا يوجد لدينا صعوبة في أن نستوعب فكرة أن معلومات كثيرة (كهذا الكتاب مثلًا) يمكن نقلها بمجموعة حروف عددها ستة وعشرون (يضاف إليها علامات ترقيم قليلة) تقدَّم في نمط تم اختياره بحرص لا يزيد في الحقيقة عن أن يكون سلسلة طويلة، حتى إذا كانت هذه السلسلة قد تم تقطيعها ورتبت لتصنع السطور فوق الصفحات. وعلى نحو مماثل، يمكن أن تُعد البروتينات رسائل كتبت بأبجدية من عشرين حرفًا من الأحماض الأمينية. المعلومات التي تختزن في البروتينات بهذه الطريقة هي التي تجعل إحدى سلاسل البروتين ملائمة لتشكيل جزء من خيط في شعرة، وتجعل سلسلة أخرى ملائمة لحمل الأكسجين وهو يدور في دمانا. ولكننا لا نريد هنا أن نتابع قصة الطريقة التي تؤدي بها الجزيئات العضوية وظائفها، وإنما ما يثير اهتمامنا الآن هو من أي مكان تأتي هذه الجزيئات العضوية (وعلى وجه الخصوص أول هذه الجزيئات). ما عرفناه هو أننا عندما يكون لدينا أحماض أمينية فإننا عندها لا نبتعد عن الحياة إلا بخطوة واحدة، ومن ثم فإن السؤال الرئيسي التالي هو من أين تأتي الأحماض الأمينية؟

الأحماض الأمينية العشرون التي تشكل مادة البروتينات هي نفسها تكاد أن تكون كلها مصنوعة من ذرات هيدروجين، وكربون، وأكسجين، ونيتروجين (وهذه هي العناصر الأربعة الأكثر شيوعًا في الكون بخلاف الهيليوم اللامتفاعل) وقد اتحدت معًا بطرائق مختلفة، وهناك فقط ذرة الكبريت الشاذة التي نجدها في حمضين أمينيين. هكذا فإنه في عشرينيات القرن العشرين طرح البيولوجي الإنجليزي جي بي سي هالدين، والعالم السوفييتي إيه إي أوبارين، كل منهما مستقلًا عن الآخر، أنه عندما كانت الأرض صغيرة السن فإن الطاقة المتاحة من حرارة الكوكب ومن ومضات البرق ربما قد شجعت تفاعلات كيميائية أدت إلى تكوين الأحماض الأمينية من الماء ومن مركبات مثل الميثان والنشادر. تم اختبار هذه الأفكار منذ خمسينيات القرن العشرين في تجارب كثيرة، أجريت بأوعية محكمة الغلق تحوي أنواعًا مختلفة من «الأجواء» وتُعرّض لشحنات كهربائية، وإشعاع فوق بنفسجي، وغير ذلك من مصادر الطاقة. أدت هذه التجارب عمومًا إلى أن تنتج بالفعل، عندما ننتظر زمنًا طويلًا كافيًا؛ مادة لزجة داكنة تحوي بالفعل أحماضًا أمينية، بما في ذلك بعض الأحماض التي تعمل كوحدات بناء للبروتين. ولكن هذا لا يثبت أن هذه هي الطريقة التي حدثت بها فوق الأرض أول الخطوات في اتجاه الحياة.

بل في الحقيقة إن تلك الثروة من الجزيئات المعقدة التي تم تعيينها الآن في الفضاء تطرح أن الأرض البدائية يكون لديها حساء أغنى كثيرًا بالمكونات الكيميائية لتبدأ به. عندما يرغب كيميائيو المعمل في تركيب أحماض أمينية فإنهم لا يبدءون بقارورة تحوي الماء، والميثان، وأول أكسيد الكربون، والأمونيا، ثم يمررون خلالها الشرارات شهورًا قليلة، وإنما هم يبدءون بأشياء مثل الفورمالدهيد، والميثانول، والفورماميد ($HCONH_2$) فيؤدون المهمة بسرعة وسهولة. كل مواد التفاعل التي تستخدم في المعمل لتركيب الأحماض الأمينية قد تم الآن العثور عليها في سحب الجزيئات الماردة، (واختصارها «سجم»). هذا يعني في أقل القليل أن الأرض يمكن أن تكون قد وُشيت بمادة من هذا النوع وذلك في وقت سريع بعد تشكيلها (سوف نناقش ذلك سريعًا فيما يلي). هناك أيضًا توقع مغوٍ بأن الأحماض

الأمينية نفسها قد تكون موجودة في سحب «سجم». بل إنه في الحقيقة كان هناك زعم في ٢٠٠٣ بأن حامض الجليسين، أبسط الأحماض الأمينية، قد تم الكشف عنه في ثلاث من السحب «سجم». على أنه جرت في ٢٠٠٥ دراسة متابعة شاملة تقارن قياسات معملية حديثة للإشعاع من الجليسين مع ما في الأرصاد واتضح منها أن هذا الزعم خطأ. ومع ذلك فإن الجليسين، بصيغته الكيميائية (NH_2CH_2COOH)، هو جزيء بسيط نسبيًّا بحيث لن يكون مفاجئًا إذا كُشف فعلًا بالمزيد من الأبحاث عن أنه يوجد في بعض سحب «سجم».

آخر التطورات هو أن بعض الجزيئات العضوية المهمة التي يعرف من قبل أنها موجودة بتركيزات منخفضة في سحب الغاز والغبار ما بين النجوم قد تم الآن تعيينها بتركيزات أكبر كثيرًا في الأقراص الغبارية المحيطة بالنجوم الصغيرة السن. مثال ذلك أن هناك منظومة تعرف باسم (IRS_{46}) تقع على بعد يقرب من ٣٧٥ سنة ضوئية من منظومتنا الشمسية، تحوي سيانيد الهيدروجين بتركيز مقداره أكبر بعشرة آلاف مثل عما يوجد منه في سحب غاز ما بين النجوم، وتحوي أيضًا تركيزات مشابهة من الأسيتيلين. أهمية هذا هي أنه عندما يُمزج معًا سيانيد الهيدروجين، والأسيتيلين، والماء في المعمل في وعاء فيه أسطح ملائمة يمكن للجزيئات أن تتنامى عليها؛ فإنها تنتج مركبات عضوية بتنوع ثري بما في ذلك الأحماض الأمينية ومعها أيضًا الأدينين، وهو أحد المكونات الأساسية للدي إن إيه، هذه المواد في القرص المحيط بمنظومة (IRS_{46}) تتركز على بعد لا يزيد عن ١٠ وحدات فلكية من النجم المركزي، بما يرادف منطقة في منظومتنا الشمسية في نطاق مدار زحل.

ربما لا نكون قد اكتشفنا بعد وحدات بناء البروتين في الفضاء، ولكننا قد اكتشفنا وحدات البناء بطول طريق طويل أعلى السلم من أشياء مثل الماء، والنشادر، وثاني أكسيد الكربون. ولا شك أننا على الأقل في موقف مبشر عندما نبحث عن وحدات بناء العائلة الأخرى من جزيئات الحياة، جزيئات الأحماض النووية.

الأحماض النووية، مثلها مثل الأحماض الأمينية، توجد في سلاسل طويلة من الجزيئات صنعت من وحدات فرعية كثيرة ربطت معًا بطول

خط، مثل حبات الخرز في قلادة، مع وجود وحدات كيميائية أخرى ملتصقة على الجانبين. إلا أن الوحدات الفرعية الكيميائية في الأحماض النووية أبسط مما في الأحماض الأمينية، وهناك تنوع فيما بينها أقل مما بين الأحماض الأمينية العشرين المهمة للحياة. أدى ذلك إلى أن خُدع علماء الكيمياء الحيوية زمنًا طويلًا، حيث اعتقدوا أن الأحماض النووية أقل أهمية من البروتينات في أشغال الخلية — وأنها ربما تكون مجرد نوع من سقالات تدعم جزيئات البروتين. إلا أنهم كانوا مخطئين.

بلغة من الكيمياء نجد أن كلًّا من الدي إن إيه وابن عمه القريب الآر إن إيه قد صنعا من السكر. وحدة البناء الأساسية في كلتا الحالتين هي جزيء سكر يسمى الريبوز، مصنوع من أربع ذرات من الكربون وذرة أكسجين واحدة ربطت معًا في حلقة خماسية. كل ذرة من ذرات الكربون الأربع لديها رابطتان فائضتان ترتبطان بذرات أخرى أو بمجموعات كيميائية أخرى. نجد في كل من الريبوز والدي أوكسي ريبوز أنه على أحد جانبي ذرة الأكسجين ترتبط إحدى ذرات الكربون بذرة هيدروجين وذرة كربون أخرى، وهذه الأخيرة نفسها ترتبط بذرات أخرى لتصنع مجموعة (CH_2OH)، في الريبوز تكون كل الذرات الثلاث الأخرى من الكربون في الحلقة مرتبطة بهيدروجين وبمجموعة هيدروكسيل (OH). أما في دي أوكسي الريبوز فنجد أن ذرة واحدة من ذرات الكربون الثلاث بدلًا من أن ترتبط بمجموعة (OH) تكون مرتبطة مع (H). هناك ذرة أكسجين واحدة منقوصة في دي أوكسي الريبوز عما في الريبوز، ومن هنا ينال الدي أوكسي[4] ريبوز اسمه.

تتعدل هذه الوحدات الأساسية قليلًا في الأحماض النووية. نجد في كل من الدي إن إيه والآر إن إيه أن ذرة الهيدروجين النهائية في مجموعة (CH_2OH) يحل محلها ارتباط بوحدة كيميائية تسمى مجموعة الفوسفات، توجد فيها ذرة فوسفور واحدة في قلبها. الجانب الآخر من مجموعة الفوسفات يرتبط بحلقة سكر أخرى مكان إحدى ذرات الهيدروجين في إحدى مجموعات (OH). توفر كل مجموعة فوسفات صلة ارتباط بين حلقتين اثنتين من السكر، وهكذا

[4] دي أوكسي تعني منقوص الأكسجين. (المترجم)

فإن العمود الفقري للحامض النووي مصنوع من ارتباطات متعاقبة في سلسلة متعاقبة: سكر-فوسفات-سكر-فوسفات-سكر-فوسفات ... سيكون هذا في حد ذاته شيئًا مملًا وبلا فائدة لأي شيء سوى أن هذه مجرد سقالات دعم. إلا أن هناك ما هو أكثر من ذلك.

بالإضافة إلى الارتباط مع مجموعات فوسفات إلى أعلى وأسفل سلسلة الحمض النووي، ترتبط كل حلقة سكر بواحدة من خمس وحدات تسمى القواعد، تبرز من جوانب السلسلة. هناك بالطبع قواعد كيميائية عددها أكثر كثيرًا من الخمس، إلا أن خمسًا منها فقط تستخدم في الأحماض النووية، بما يماثل تمامًا أن هناك ما هو أكثر كثيرًا من عشرين حمضًا أمينيًا، ولكن عشرين منها فقط تستخدم في البروتينات. كل هذه القواعد الخمس قد بنيت حول حلقات سداسية يوجد فيها أربع ذرات كربون وذرتان من النيتروجين. ترتبط القواعد بمجموعات السكر في سلسلة الحامض النووي بأن تحل الواحدة منها مكان مجموعة (OH) المرتبطة بإحدى ذرات الكربون في حلقة السكر فترتبط الحلقة هكذا مع إحدى ذرات النيتروجين في القاعدة. أسماء القواعد الخمس هي: يوارسيل، وثيمين، وسيتوزين، وأدينين، وجوانين. ويشار إليها عادة بالحروف الأولى من أسمائها. توجد أربع قواعد فقط من الخمس في كل حمض نووي. يحوي الدي إن إيه قواعد جوانين، وأدينين، وسيتوزين، وثيمين، ويحوي الآر إن إيه جوانين، وأدينين، وسيتوزين، ويوراسيل. إلا أن من الأمور المهمة تمامًا أن هذه القواعد تستطيع أن تظهر بأي ترتيب بطول الجزيئات، «لا تهتم» الكيمياء في الخيط الواحد من الدي إن إيه بما إذا كانت (ج) تقبع تالية لـ(أ) أو (س) أو (ث). يعني هذا أن كل جزيء من حامض نووي، بدلًا من أن يحوي تكرارًا مملًا للسكر نفسه ومجموعات الفوسفات نفسها تتكرر المرة بعد الأخرى، أو بدلًا من أن يحوي تكرارًا يساوي ذلك في أنه غير مزود بالمعلومات، من نوع تكرار ج أ س ث ج أ س ث أ س ث ج أ س ث ....، بدلًا من هذا فإن الأحماض النووية تحوي معلومات. إنها تحمل «رسالة» مكتوبة بأبجدية من أربعة حروف بطول عمودها الفقري. إنها رسالة الجينات.

من الممكن كتابة أي رسالة بأبجدية من أربعة حروف (أو بشفرة) إذا كانت الرسالة بالطول الكافي. بل في الحقيقة يمكن لأي رسالة أن تتم

كتابتها بشفرة ثنائية من حرفين اثنين، خيط من أرقام الواحد والصفر، مثل ذلك المستخدم في الكمبيوتر. أوردنا فيما سبق قياسًا بالتمثيل بين الرسالة المكتوبة في هذا الكتاب بالحروف الستة والعشرين للأبجدية (الإنجليزية) وبين المعلومات التي تحويها البروتينات «مكتوبة» بأبجدية الأحماض الأمينية ذات العشرين حرفًا؛ يمكننا بمثل ذلك تمامًا أن نقول إن رسالة كتابنا مكتوبة بشفرة ثنائية من حرفين، حيث إن هذه هي الشفرة المستخدمة فعلًا داخل الكمبيوتر الذي كتب عليه الكتاب. إذا كان خيط من أرقام الواحد والصفر يستطيع أن ينقل كل المعلومات في أحد الكتب أو في أكثر من كتاب، فمن ثم يستطيع أن يفعل ذلك خيط من حروف ج، وأ، وس، وث أو يو (الشفرة الجينية).

ليس هذا الكتاب بالمكان للدخول في التفاصيل الرائعة للطريقة التي يحدث بها داخل الخلية أن تستفيد ماكينة الحياة من المعلومات المختزنة في الشفرة الجينية لدنا، وتترجمها بمساعدة رنا لتصنع الأحماض الأمينية التي تُجمّع بدورها لصنع البروتينات،[5] إلا أن حقيقة أن دنا يحمل بالفعل الشفرة الجينية حقيقة معروفة جيدًا بحيث يمكن هنا أن نذكر النقطة المهمة فيما يتعلق بذلك — إذا كنا نبحث عن جزيئات يمكن أن تكون المواد المبشرة مسبقًا بصنع الحياة، ينبغي إذن أن نبحث عنها، ليس فقط في الأحماض الأمينية ووحدات بنائها، وإنما نبحث عنها أيضًا من خلال الريبوز ووحدات بناء الريبوز. بل إن علماء فلك الراديو ظلوا في الحقيقة يبحثون عن وحدات بناء من هذا النوع — ووجدوها في السنوات المبكرة من القرن الحادي والعشرين.

وجد هؤلاء العلماء بوجه خاص بعض ملامح في الطيف الراديوي لسحابة فيما بين النجوم اسمها القوس والرامي Sagittarius، وتبعد حوالي ٢٦٠٠٠ سنة ضوئية عن الأرض، وهذه الملامح تناظر سكرًا يسمى ألدهايد الجليكول (CH_2OHCHO). هذه الذرات هي بالضبط الذرات نفسها مثل تلك الموجودة في حمض الخليك وفورمات المثيل، ولكنها مرتبة بطريقة مختلفة،

[5] يمكن العثور على هذه القصة في كتب كثيرة، بما فيها كتابي «البحث عن اللولب المزدوج» (١٩٨٧).

وكلا هذين المركبين تم الكشف عنهما أيضًا في سحب ما بين النجوم). تم الكشف عن السكر في مناطق دافئة من السحابة وكذلك أيضًا في مناطق باردة حرارتها ٨ كلفن، وهو موجود بكميات كبيرة. ربما تكوّن هذا السكر عندما انتشرت موجات الصدمة خارجة من أماكن تكوين النجوم الجديدة في السحابة، ووفرت هذه الموجات الطاقة اللازمة لإتاحة وقوع التفاعلات الكيميائية الملائمة. من الواضح أن التفاعلات الكيميائية لم تتوقف هناك، وذلك لأن الأرصاد تكشف أيضًا عن وجود جليكول الإثيلين في السحابة نفسها. جليكول الإثيلين جزيء من عشر ذرات يتشكل بإضافة ذرتين من الهيدروجين إلى الدهايد الجليكول، وهو يثير الاهتمام بما هو أكثر كثيرًا من مركب سيانوبنتاسيتلين. جليكول الإثيلين أحد أكبر الجزيئات التي تم تعيينها إلى الآن في الفضاء، وهو مألوف إلى أقصى حد في الحياة اليومية باعتباره المادة المكونة لمضادات التجمد.

اكتشاف ألدهايد الجليكول له بالذات أهمية مزدوجة. فهو بوجه عام مثل آخر لحقيقة أن أنواع الجزيئات التي تكتشف الآن في الفضاء تماثل الجزيئات التي تُنتج في تجارب المعمل والتي تصمم خصوصًا لتركيب جزيئات ما قبل الحياة، ثم نجد بوجه خاص أنه على الرغم من أن ألدهايد الجليكول مبني حول قلب من ذرتين فقط من الكربون، فإن من المعروف أنه يتفاعل بسهولة مع سكر من ثلاث ذرات كربون ليشكل الريبوز. تطرح كل الأدلة أن الكيمياء التي تجري في سحب الجزيئات الماردة في مجرتنا تكون هي نفسها في كل مكان، وهي الكيمياء التي تؤدي إلى إنتاج جزيئات بيولوجية مركبة بما في ذلك الأحماض الأمينية والنووية. يبقى هناك سؤالان: إلى أي مدى يمكن أن تظل عملية بناء التركب تجرى في سحب «سجم»؟ وكيف تهبط الجزيئات المركبة إلى سطح كوكب كالأرض؟

الإجابة المثيرة عن السؤال الأول ترتبط مباشرة بمدى إتاحة الكربون في سحب ما بين النجوم. أحد الأسباب في أن الكربون يشيع إلى حد بعيد في الكون هي أن «حرق» الكربون يقع فقط داخل النجوم التي تكون كتلتها أكثر من ثمانية أمثال كتلة الشمس. كتلة ما يقرب من ٩٥ في المائة من النجوم كلها أقل من ذلك، ومن ثم فإن الاحتراق النووي في داخلها لا يذهب

قط إلى مدى أبعد من دمج نوى الهيليوم لصنع نوى كربون. أن يتم صنع الكربون في قلوب النجوم، فهذا يعد أحد الأمور، أما أن يصل الكربون بعدها إلى سطح النجم أولًا ثم يتم قذفه في الفضاء فهذا أمر آخر. ولكن حقيقة أن النجوم تستطيع إنجاز هذه المحاولات تتضح مما يوجد من الأدلة من تحليل الطيف تدل على أنه توجد جزيئات غاز وحبيبات غبار في مادة الأغلفة الممتدة التي نراها حول الكثير من النجوم عند مرحلة معينة من دورة حياتها. إنها المرحلة التي ينتفخ فيها الجزء الخارجي من النجم ويصبح عملاقًا أحمر، ولأسباب تاريخية يقال عن هذا النجم إنه «فرع»[٦] عملاق بخط مقارب،[٧] ويشار إليه أحيانًا بأنه نجم من نوع «إيه جي بي AGB» (وهو اختصار Asymptotic Giant Branch). بما أن سحب المادة المتمددة حول نجوم «إيه جي بي» تتحرك بسرعة بالغة بحيث إنها لا بد أن تتشتت خلال آلاف قليلة من السنين، فإن الأدلة من الجزيئات والغبار في هذه السحب تبين أن البنى المركبة يتم إنتاجها فيها بسرعة قصوى بمقاييس الزمان الفلكي.

النجوم مثل الشمس (ما يسمى بالفصيلة I) تبدأ بالفعل مرحلة «إيه جي بي» من عمرها وفيها أكسجين أكثر من الكربون. تبين محاكيات الكمبيوتر أن الكربون المصنوع في قلب النجم يُرفع إلى السطح بتيار الحمل، حيث يتراكم في طبقات النجم الخارجية الرفيعة السمك حتى يفوق عدد ذرات الكربون عدد ذرات الأكسجين (إذا استمرت العملية زمنًا طويلًا بما يكفي، إلا أن النجوم لا تصل كلها إلى هذه النقطة). إحدى الغرائب التي تساعد على صنع الكربون بما له من أهمية بالغة للحياة هي أن ذرات الكربون تستطيع أن ترتبط بذرات الكربون الأخرى بطرائق مختلفة إذا كانت الظروف مناسبة، وهكذا فعلى الرغم من أن معظم ذرات الكربون تتحد مع الأكسجين لتكوين أول أكسيد الكربون، ويرتبط بعضها بالنيتروجين لصنع مجموعة (CN) إلا أنه يتبقى بعض الكربون ليشكل أنواعًا مختلفة مثل C_2 وC_3. النجوم التي تُظهر ملامح طيفية تناظر هذه المواد تسمى نجومًا كربونية، وإن كانت بالطبع ليست مصنوعة كلها من الكربون.

---

[٦] الفرع هنا منطقة من خريطة معيارية للنجوم إزاء لون النجم، ويسمى هذا بالرسم البياني لهيرتزبرونج-راسل.
[٧] الخط المقارب خط يكون عادة مستقيمًا يواصل الاقتراب من أحد المنحنيات ولكنه لا يلتقي معه أبدًا. (المترجم)

يتضخم نجم «إيه جي بي» النمطي إلى قطر مقداره مئات الأمثال لقطر الشمس، ويصل إلى لمعان مقداره آلاف عديدة مثل لمعان الشمس أثناء هذه المرحلة من حياته. عند هذا الحجم يكون شد الجاذبية عند سطح النجم ضعيفًا جدًّا ويكون الضغط إلى الخارج بإشعاع النجم قويًّا جدًّا. ينتج عن ذلك أن المادة تفر من سطح النجم في رياح نجمية، تحمل بعيدًا ما يساوي جزءًا من عشرة آلاف من كتلة الشمس في عام واحد. لا يبدو هذا مقدارًا كبيرًا، ولكنه عبر ألف سنة يعني أن النجم يفقد مادة بمقدار عُشر كتلة الشمس، بما يساوي ٣٣٠٠٠ مثل لكتلة الأرض. ينتج عن درجات الحرارة المنخفضة في هذه السحابة المتمددة من المادة، أنه يمكن تشكيل جزيئات مستقرة كثيرة. تمت رؤية ما يزيد عن ستين نوعًا مختلفًا من الجزيئات في أطياف نجوم «إيه جي بي»، بما في ذلك مركبات عضوية بسيطة مثل (H_2CO) و(CH_3CN)، وجزيئات حلقية بما في ذلك الجزيء المثلث للبروبينيليدين (C_3H_2)، وصديقنا القديم وإن كان صديقًا مملًّا ($HC_{11}N$).

الجسيمات الصلبة التي تم تعيينها في المادة المحيطة بنجوم «إيه جي بي» تتضمن السيليكات وكربيد السليكون (SiC). تمتص هذه الجسيمات ضوء النجم وتعيد إشعاع الطاقة التي امتصتها في المنطقة تحت الحمراء من الطيف، يوجد حول بعض نجوم «إيه جي بي» غبار يبلغ من كثرته أنها لا يمكن رؤيتها مطلقًا باستخدام الضوء البصري، وإنما يتم تعيينها فقط بمساعدة من التلسكوبات تحت الحمراء. كنتيجة لأن الإشعاع تحت الأحمر يُمتص بجو الأرض، كما سبق أن ذكرنا، فإن هذه النجوم يتم تعيينها فقط من المراصد تحت الحمراء للأقمار الصناعية، أو من التلسكوبات فوق الجبال المرتفعة التي تعلو فوق طبقات الجو المعتّمة. نتج عن ذلك أن الأبحاث عن أنواع الجزيئات و(بوجه خاص) الأبحاث عن الجسيمات الصلبة في الأغلفة المحيطة بنجوم «إيه جي بي» تُعد أبحاثًا من نوع جديد من علم الفلك حيث لا يزال مجال الأدلة مفتوحًا لتفسيرات متنوعة، ولا يوجد تفسير واحد واضح للأرصاد. لا بد من إجراء الأبحاث عن المادة في السحب المحيطة بالنجوم بواسطة المقارنة بين الأطياف تحت الحمراء لهذه النجوم

وبين أطياف المواد المعدنية التي تدرس في المعمل. على أنه سيبقى هناك دائمًا الإمكان بأن البيئة النجمية ربما تنتج مواد ليست معروفة هنا فوق الأرض. إلا أنه لا يزال هناك الكثير مما يمكن أن نستنتجه بشأن ما يحدث في هذه السحب. على الرغم من أن بعض الاستنتاجات التي سنعرضها هنا فيها تخمين إلى حد ما، كجزء مما «نظن» أننا نعرفه، إلا أنها تطرح مفاتيح مغوية عن أصل الحياة.

النجوم العملاقة ليس لديها كلها أجواء يهيمن عليها الكربون. في بعض الحالات لا يزيد عدد ذرات الكربون بأي حال عن عدد ذرات الأكسجين. وفي أي من الحالين، ينحبس المكون الأصغر في جزيء من (CO)، وإن كان قد يشارك في النهاية في تفاعلات أخرى. في النجوم الغنية بالأكسجين، تكون المركبات الناتجة في أغلبها أوكسيدات، وفي النجوم الغنية بالكربون يتم إنتاج مركبات عضوية. على أن كلا هذين النوعين من المادة يتوزع مشتتًا في الفضاء ويمتزج بالهيدروجين والهيليوم الأوليين لتتكون المادة الخام التي يتشكل منها الجيل التالي من النجوم والكواكب.

أهم هذه الأوكسيدات (بصرف النظر عن الماء) هي السيليكات، أي أوكسيدات السيليكون متحدة أحيانًا بعناصر أخرى. الرمل العادي يتكون في أغلبه من حبيبات من أبسط السيليكات، أي ثاني أوكسيد السيليكون (SiO_2)؛ السيليكات هي أكثر المعدنيات شيوعًا في القشرة الأرضية وقد تم الكشف عنها في أطياف أكثر من أربعة آلاف نجم من نوع «إيه جي بي»، ومن ثم فإنه لا يوجد أي سر حول أصلها. هناك أوكسيدات أخرى مصاحبة لنجوم «إيه جي بي» تم تعيينها في عهد مراصد الأشعة تحت الحمراء التي تدور في الفضاء، بما في ذلك الكورندوم[8] Corundum والاسبينيل Spinel، مزيج من أوكسيدات الألمونيوم متحدة مع مغنسيوم وحديد. على الرغم من أن هذه الاكتشافات مثيرة، إلا أن ما يهمنا هنا حقًا هو المواد العضوية المصاحبة للنجوم الغنية بالكربون.

---

[8] الكورندوم أوكسيد للألمونيوم هو ثاني أصلب المعدنيات الموجودة طبيعيًا بعد الماس، وهو معروف على الأرض بطريقة أكثر شيوعًا في شكل الياقوت والصفير أو الياقوت الأزرق، وإن كان لا يوجد ياقوت وصفير في جو نجوم «الإيه جي بي». وتكون مادة الكورندوم هناك في حالة رخوة تعرف بالطور اللامتبلور.

حتى في نجوم «إيه جي بي» الغنية بالكربون، نجد أن أكثر الجوامد شيوعًا مما تأكد تعيينه في حبيبات الغبار هو كربيد السليكون SiC الذي عثر عليه في ٧٠٠ نجم كربوني. إلا أن الملامح الطيفية التي تُعزى إلى كربيد السيليكون تكون أضعف في نجوم الكربون الأكثر بعدًا في دورة حياتها، الأمر الذي يخبرنا بأن كربيد السيليكون لم يعد بعد أحد المكونات المهيمنة في الغبار. ها هنا يأتي عنصر التخمين. هناك ملامح انبعاث قوية وإن كانت لا تزال غير محددة الهوية وذلك في أطياف نجوم كربونية قد تجاوزت مرحلة «الإيه جي بي». بحلول ٢٠٠٤ لم يعثر إلا على اثني عشر نجمًا فقط تظهر أول هذه الملامح، ولا يوجد تفسير واضح لهذا الملمح الطيفي سوى أنه ناتج عن نوع من الكربون. على أن هذا الملمح ينتشر عبر مدى واسع من أطوال الموجات تحت الحمراء، وهو لا يحوي الخطوط الطيفية الحادة التي تصاحب التنوعات الفردية لجزيئات مثل كربيد السيليكون. الملمح الثاني الذي عثر عليه في أطياف النجوم الكربونية عند طول موجة مختلف (أو بالأحرى الذي ينتشر عبر مدى مختلف من أطوال الموجات) يبين وجود خصائص مشابهة للملمح الأول. يمكن تفسير كلا الملمحين بالتأثير المجتمع لأشعة تحت حمراء تأتي من جزيئات حلقات كربونية كثيرة جدًّا ترتبط معًا، وإن كان لا يوجد حتى الآن برهان على أن هذا هو ما يجري.

المركبات التي تحوي هذه الحلقات الكربونية تعرف باسم المركبات الأروماتية aromatic،[٩] لأنها كثيرًا ما يكون لها رائحة واضحة — وإن لم تكن دائمًا رائحة محببة. المثل النموذجي لهذه الجزيئات هو البنزين وتركيبه الجزيئي هو (C_6H_6) ويتألف من ٦ ذرات كربون مربوطة معًا في حلقة سداسية مع ارتباط ذرة هيدروجين واحدة بكل ذرة كربون، يعرف هذا التركيب بأنه حلقة البنزين وهو قابع في القلب من كل الجزيئات التي يسميها الكيميائيون بالأروماتية، وأحيانًا تكون هناك ذرة من عنصر مختلف تحل مكان إحدى ذرات الكربون في الحلقة.

في أحد الأمثلة على هذا النوع من الجزيئات، نجد أن ذرة الكربون الشاذة يحل مكانها ذرة أكسجين، بما يصنع حلقة بيران (C_5O). حلقات

[٩] كلمة aromatic تعني أصلًا قوي الرائحة أو عطري. (المترجم)

البيران تشكل بسهولة سلاسل طويلة تكون فيها كل حلقة مرتبطة بجارتها عند كلا الطرفين بذرة أكسجين تعمل كجسر بين الحلقتين. عمومًا تسمى هذه السلاسل الطويلة البوليمرات،[١٠] أو السكريات المتعددة[١١] في هذه الحالة بالذات. ما إن توجد سلاسل قليلة من هذا النوع، حتى تنحو إلى أن تتنامى بأن تتلقف المزيد من ذرات الكربون والأكسجين إذا كانت متاحة، وتحولها إلى مزيد من حلقات البيران. وإذا انقسمت إحدى السلاسل، فسيكون لدينا عندها سلسلتان من السكريات المتعددة. القدرة على التنامي والتكاثر هي خاصية أساسية للحياة، وعلى الرغم من أن السكريات المتعددة ليست حية، إلا أنها تضرب مثلًا يوضح كيف يمكن لهذه الخاصية الأساسية أن تنبثق طبيعيًّا عندما تصبح الكيمياء أكثر تعقدًا.

مما له أهمية حاسمة أن الأسيتيلين، وحدة البناء الأساسية للبنزين وغيره من المركبات الأروماتية، هو أحد الجزيئات التي تم تعيينها بالفعل في هذه السحب. الملامح العريضة في أطياف نجوم الكربون موجودة في الجزء الأيمن من الطيف تحت الأحمر حيث تكون مصاحبة لمط وانحناء روابط C—H وروابط C—C في حلقات البنزين، مما ينتج عنه ملامح يشار إليها على نحو جماعي بأنها الشرائط أو الخطوط الأورماتية تحت الحمراء. إلا أن الملامح في الأطياف الآتية من الفضاء لا يمكن تفسيرها إلا إذا ارتبطت معًا حلقات بنزين كثيرة جدًّا في صفحـات وسلاسل من الحلقات السداسية، كتلة من مواد كربوناتية تحوي على الأقل مئات من ذرات الكربون. هذه الاتحادات لأعداد كبيرة من حلقات البنزين تعرف بالهيدروكربونات[١٢] الأروماتية متعددة الحلقات. من الصعب جدًّا إجراء محاكيات للظروف التي توجد فيها هذه البنى المعقدة في أعماق الفضاء حتى يمكن قياس أطيافها في المعمل. ومع ذلك، فقد أُجري سبر لبنية جزيئات

---

[١٠] البوليمر: مادة توجد طبيعيًّا أو تخليقيًّا وتتكون من جزيئات كبيرة مصنوعة من سلسلة متكررة من وحدات أصغر. (المترجم)

[١١] السكريات المتعددة: مواد سكرية مركبة تنتج عند تحللها المائي أكثر من جزيء سكر بسيط واحد، كجزيئات الجلوكوز مثلًا. (المترجم)

[١٢] الهيدروكربون: مركب مصنوع من الهيدروجين والكربون فقط، ويكثر وجود الهيدروكربونات في زيت البترول والغاز والفحم. (المترجم)

تخليقية من الهيدروكربونات الأروماتية متعددة الحلقات باستخدام شعاع ليزر فيما يقرب من أن يكون فراغًا وعند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق، وأجريت هذه التجارب في ٢٠٠٢ في معمل نيجمجن في هولندا ونتج عنها أفضل الأدلة حتى الآن على صحة تعيين هذه الهيدروكربونات. يمكن للهيدروكربونات الأروماتية المتعددة أن ترتبط أيضًا مع سلاسل من جزيئات أصغر تتأسس على الكربون، ويمكن لهذه السلاسل أن تعمل كجسور للربط بصفحات أخرى من هذه الهيدروكربونات. هناك مادة يشيع وجودها جدًّا فوق الأرض ولها أساسًا هذا التركيب، وهي الفحم.

هناك دليل قوى على أن هذا هو التفسير الصحيح لشرائط الانبعاث العريضة تحت الحمراء التي تُرى في النجوم الكربونية وتأتي من خلال منظومتنا الشمسية. الكويكبات شظايا تتخلق عن تكوين المنظومة الشمسية ولا تزال تهوى أحيانًا إلى الأرض، وهي تحوي مواد فيها ما يمثل المواد الصلبة في سحابة الغاز والغبار التي تكونت منها المنظومة الشمسية. أكثر المواد العضوية شيوعًا التي يعثر عليها في الكويكبات هي الكيروجن kerogen، وهي مادة تشبه الفحم، وهي المكوّن العضوي الصلب في الزيوت الحجرية، وتُنتج بالتسخين هيدروكربونات مشابهة للبترول. لا يعني هذا أن الفحم وزيت البترول يأتيان من الفضاء، وإنما نحن نطرح أن الهيدروكربونات الأروماتية متعددة الحلقات قد تكون أحد المكونات التي نشأت عنها الحياة، في حين أن الفحم والبترول هما بقايا لما كانت ذات مرة كائنات حية، ومن ثم فإن كلًّا من هذين النوعين من المركبات يقع عند الطرف المقابل من قصة الحياة — هذه حالة من «الفحم إلى الفحم» بدلًا من «الرماد إلى الرماد».

في ٢٠٠٥ أجرت ناسا عن عمد اصطدامًا لجسمها الفضائي Deep Impact مع أحد المذنبات المسمى تمبل-١ Tempel-I، وأدى ذلك إلى تقليب واستثارة مادة المذنب، وحللت هذه المادة عند أطوال الموجات تحت الحمراء باستخدام تلسكوب سبيتزر فوق الأرض. أدت نتائج التحليل إلى إثارة دهشة الكثيرين من علماء الفلك (ولكنها لم تثر دهشة من كان منهم يتابع القصة التي وصفنا خطوطها الخارجية هنا) ذلك أن الأطياف الآتية من مادة المذنب كشفت عن وجود سليكات، وكربون، ومواد تشبه الطَّفل، ومركبات تحمل

حديدًا، ومركبات هيدروكربونات أروماتية تشبه ما يعثر عليه عند الشي وفي انبعاثات العادم. بالنسبة لمن كانوا يتابعون القصة، كانت هذه الاكتشافات رائعة ومُرضية وقد قدمت قطعة أخرى من الصورة أخذت وضعها الملائم بالكامل في حل لغز الصورة المجزأة، لغز الصورة المنبثقة عن طريقة هبوط المواد اللازمة للحياة فوق الأرض.

الكويكبات لديها أيضًا بعض ما تخبرنا به حول أصل الحياة. ذكرنا فيما سبق أن الحياة تستفيد فائدة واسعة من الكربون، والهيدروجين، والأكسجين، والنيتروجين، وهي العناصر الأربعة التفاعلية الأكثر شيوعًا. العناصر الأخرى توجد بكميات أصغر كثيرًا في جزيئات الحياة، كما قد يتوقع المرء من ندرتها النسبية، إلا أن هناك استثناءً واحدًا غريبًا. الفوسفور كما سبق أن رأينا هو مكوّن أساسي للأحماض النووية، كما أنه يظهر أيضًا في جزيئات الحياة الأخرى بكميات قد تبدو أول الأمر مثيرة للدهشة. حتى نجعل لذلك منظوره، نذكر أن هناك في الكون عمومًا ذرة فوسفور واحدة لكل ألف وأربعمائة ذرة أكسجين، أما البكتريا (وهي كائنات وحيدة الخلية تُعد بطرائق كثيرة الوحدة الأساسية للحياة) فنجد فيها ذرة فوسفور واحدة لكل اثنتين وسبعين ذرة أكسجين، بما يجعل الفوسفور خامس أهم عنصر بيولوجي من حيث الكتلة.

سبب ذلك أن الفوسفور لديه براعة غير عادية في تشكيل روابط مع الذرات الأخرى. هناك خواص مميزة من ميكانيكا الكم تؤثر في سلوك الإلكترونات في ذرة الفوسفور، ومن خلال ذلك يمكن أحيانًا لذرة فوسفور وحيدة أن تصنع روابط مع خمس ذرات أخرى في الوقت نفسه. يؤدي هذا إلى أنه يمكن للفوسفور أن يشكل عنصر تكوين لعدد هائل من الجزيئات، وأن يربط معًا وحدات كيميائية أخرى بطرائق معقدة ومثيرة للاهتمام. عندما نعرف ذلك، لن يدهشنا أن نجد أن الفوسفور مكون أساسي للتعقد في الحياة، قدرة الفوسفور على تكوين روابط كيميائية كثيرة بهذه الطريقة فيها ما هو أكثر من التعويض عن ندرته (وتؤدي إلى وجود تباين كلي بينه وبين الهيليوم الذي يشكل ما يصل إلى ٢٥ في المائة من المادة الباريونية في الكون، ولكنه لا يكوّن أي روابط ثابتة مع أي شيء، ومن ثم فهو غائب

بالكامل عن جزيئات الحياة). يستطيع أي بستاني أو مزارع أن يخبرك عن مدى أهمية الأسمدة الفوسفاتية للنباتات.

ما علاقة ذلك بالكويكبات؟ تحوي الكثير من الكويكبات الفوسفور وقد ارتبط في تشكيل معدني مع الحديد والنيكل. في ٢٠٠٤ أجرى الباحثون في جامعة أريزونا تجربة بسيطة أُخذ فيها أحد هذه المعدنيات المعروف باسم شرايبرسايت، ووُضع ملامسًا لماء عادي في درجة حرارة الغرفة. أدى ذلك إلى تفاعلات كيميائية أنتجت أنواعًا شتى من مركبات الفوسفور، بما في ذلك أوكسيد (P_2O_7)، الذي يستخدم في عمليات بيوكيميائية عديدة ويشابه أحد مكونات مركب يسمى الفوسفات الثلاثي للأدينوزين (Adenosine triphosphate—ATP) وهو يستخدم لتخزين الطاقة في كل الخلايا الحية. أحد مهام «إيه تي بيه» هو أن يوفر القوة الدافعة لانقباض العضلات. إلا أن الباحثين قد وجدوا مرة أخرى أدلة على وجود وحدات البناء لوحدات بناء الحياة في الفضاء. وُجد أن الكويكبات تحوي أيضًا أحماضًا أمينية (بما يؤكد أن هذه الوحدات لبناء البروتين كانت موجودة من قبل في المادة التي تشكلت منها المنظومة الشمسية)، وتحوي كذلك حمض الكربوكسليك، وسكريات بما في ذلك الجلسرين، وهو سكر تستخدمه الآن كل الخلايا على الأرض لبناء جدران الخلية، والجلوكوز، وهو جزيء في حلقة سداسية ($C_6H_6O_6$) مهم للتنفس.

هناك شيء آخر حول الجزيئات الموجودة في الكويكبات التي توفر صلة بين الحياة على الأرض الآن وأصول جزيئات الحياة في الفضاء. الجزيئات المعقدة مثل الأحماض الأمينية والسكريات الأكثر إثارة للاهتمام، لها أشكال متميزة ثلاثية الأبعاد ويمكن أن توجد عادة في أي من شكلين اثنين هما صورة مرآة أحدهما للآخر، مثل فردتي اليد اليسرى واليمنى لزوج من القفازات. يشار إلى هذين الشكلين عادة على أنهما أيسومر[١٣] أيسر للجزيء كاليد اليسرى للقفاز، وأيسومر أيمن للجزيء كاليد اليمنى.

---

[١٣] المواد الأيسومرية مواد تتماثل في نسب تركيبها ووزنها الجزيئي ولكنها تختلف في طريقة ترتيب ذراتها. وهكذا فعلى الرغم من تشابه التركيب فإن هناك اختلافًا في الخواص. (المترجم)

هذا «التوصيف كيد» يمنى أو يسرى يتحدد حسب الطريقة التي تؤثر بها الجزيئات في الضوء المستقطب. يمكننا أن نتصور الضوء المستقطب كسلسلة مويجات رأسية تجري بطول حبل مشدود، تأثير الأيسومر الأيسر والأيسومر الأيمن هو أن الواحد منهما يغير الزاوية التي تصنعها المويجات، بحيث إن المويجات بعد أن كانت رأسية تميل قليلًا إلى اليسار أو اليمين. عندما يخلّق الكيميائيون هذه الجزيئات من الذرات الأساسية التي تتكون منها، يحصلون على كميات متساوية من الشكلين الأيسر والأيمن. لا تحابي القوانين في الكيمياء الكمومية أيًا من النوعين على الآخر. على أن الحياة فوق الأرض تكاد تستخدم حصريًّا الأحماض الأمينية اليسرى لبناء البروتينات، وتكاد تستخدم حصريًّا السكريات اليمنى لبناء الأحماض النووية. مثال ذلك أن جزيء دنا لن يستطيع أن يستفيد من الجزيء الأيسر لدى أوكسي ريبوز، تمامًا مثلما لا يستطيع الواحد منا أن يرتدي فردة القفاز اليسرى في تواؤم مع يده اليمنى.[١٤]

أول ما يخبرنا به هذا (مما يقدم لنا دليلًا آخر) هو أن كل ما على الأرض الآن من حياة ينحدر من سلف مشترك. إذا كان الشكل السلفي للحياة — الخلية الأصلية — ربما قد اتفق لا غير أنه استخدم هذه الأيسومرات، فإن كل الذرية ستستمر في فعل ذلك، بصرف النظر عن وجود نسخ بصورة المرآة لهذه الجزيئات في البيئة. ومن ثم فقد بدا حتى وقت قريب أن هناك إمكانًا مثيرًا بأنه لو كانت قد وجدت أشكال للحياة مماثلة لنا فوق الكواكب المجاورة، فإنها ربما ستستخدم أحماضًا أمينية يمينية وسكريات يسارية، أو يكون لديها كلا النوعين من الجزيئات في وضع اليد نفسه. نتج عن ذلك تنويعات عديدة على هذا اللحن في روايات للخيال العلمي، فيها حكايات عن مسافري فضاء ضلوا الطريق، وأخذوا يهلكون جوعًا وسط وفرة في الطعام لأن أيضهم لا يتواءم مع الطعام الموجود في عوالم أخرى. على أن علماء البيولوجيا الفلكية اكتشفوا في أواخر تسعينيات القرن العشرين أن الأحماض الأمينية التي عثر عليها في الكويكبات هي

---

[١٤] هذا هو السر بشأن مواد التحلية ذات السعرات المنخفضة، فهي إذا كانت مصنوعة من جزيئات سكر يسرى لن يستطيع الجسم استخدامها، حتى وإن ظل لها طعم حلو.

أيضًا ذات وضع كاليد اليسرى. هذه اللاسمترية موجودة من قبل في المواد السلف لجزيئات الحياة قبل تكوين المنظومة الشمسية.

هناك طريقتان لتوفير فائض من الجزيئات في أحد الوضعين لليد بما يزيد عن جزيئات الوضع الآخر. إما أن نصنع في المقام الأول المزيد من أحد الأيسومرين، أو أن ندمر الأيسومر الثاني بعد أن يتم صنعه. في تجارب المعمل تتم إزالة جزيئات أحد الوضعين إزالة تفضيلية بتأثير ضوء مستقطب دائريًا. (من الصعب تصوير ذلك، إلا أن الضوء المستقطب دائريًا يسلك وكأن موجات الضوء تكون في حالة دوران وهي تتحرك خلال الفضاء، مثلما يدور مسمار لولبي (قلاووظ) وهو يُدفع داخل قطعة خشب). القطعة الأخيرة من هذا اللغز بالذات اتخذت وضعها الملائم عندما اكتشف علماء الفلك باستخدام التلسكوب الإنجليزي-الأسترالي في جبل سيدينج سبرينج في أستراليا ضوءًا مستقطبًا دائريًا (في المنطقة تحت الحمراء) يأتي من سحابة الجوزاء Orion الجزيئية. هذه منطقة تتكوّن فيها النجوم، وتم فيها الكشف عن جزيئات عضوية. يبدو من المؤكد أن الضوء المستقطب دائريًا في المنطقة يطبع على هذه الجزيئات العضوية توجهًا مفضّلًا مثل صورة اليد اليمنى أو اليسرى، وذلك قبل أن تتقلص أجزاء من السحابة لتشكل نجومًا وكواكب جديدة.

ما يتضمنه ذلك هو أن نمطًا مميزًا من توجه الجزيء كاليد اليسرى أو اليمنى سينطبع على كل المادة التي تتشكل منها مجموعة من النجوم معًا. ولكن حيث إن الضوء المستقطب دائريًا يمكن له هو نفسه أن يكون باتجاه إلى اليسار أو اليمين، حسب الطريقة التي يدور بها، فإن الجزيئات في السحب المختلفة ما بين النجوم (أو حتى في الأجزاء المختلفة من نفس سحابة «سجم») قد تتأثر بطرائق مختلفة. وهكذا فإنه على الرغم من أن من المؤكد الآن أنه إذا كان هناك أحماض أمينية في أي مكان آخر غير المنظومة الشمسية فإنها ستكون جهة اليسار، مثل الأحماض الأمينية على الأرض؛ فإنه يمكن مع ذلك وجود تنويعات مختلفة على لحن التوجه يسارًا أو يمينًا في الأجزاء المختلفة من المجرة. وهكذا فإن تلك الحكايات من الخيال العلمي يمكن على أي حال أن تثبت صحتها إذا غامر رواد الفضاء بالسفر بعيدًا بما يكفي.

لدينا في هذا ما يكفي الآن من أدلة على أن وحدات بناء الحياة تكون موجودة من قبل في سحابة المادة التي تكونت منها الشمس هي وعائلتها من الكواكب، بما في ذلك الأرض. رأينا أيضًا فيما سبق أن هذه المادة يمكن أن تهبط على سطح الأرض داخل الكويكبات. من الممكن أن يكون هذا في حد ذاته كافيًا لأن يطلق عملية بدء الحياة فوق الأرض. على أن هناك حتى طريقة أفضل لإنزال المادة الأرضية للأرض، ستكون أكثر فاعلية عندما تكون المنظومة الشمسية صغيرة السن — وذلك في داخل المذنبات.

لم تعد المذنبات بعد تلك الأجرام الغامضة التي أثارت خوفًا خرافيًّا في أسلافنا. بدأت عملية ترويض المذنبات في القرن الثامن عشر، عندما تنبأ إدموند هالي تنبؤًا صحيحًا بعودة المذنب الذي يحمل الآن اسمه، موضحًا أن المذنبات أعضاء عادية في المنظومة الشمسية، تقع تحت تأثير الجاذبية، وتخضع للقوانين نفسها مثل الكواكب والأجرام الأخرى التي تتحرك حول الشمس. في الأزمنة الحديثة تمت دراسة المذنبات بتحليل الطيف من الأرض، كما تمت أيضًا زيارة المذنبات بمجسات فضائية تحلق بالقرب من سطحها، وفي حالة تمبل-١ الدرامية تم في ٢٠٠٥ أن ارتطم مجس عن عمد بداخل المذنب، موفرًا صورًا مقربة ومثيرًا تفجرًا من المادة كشف (بدون مفاجأة لأحد) عن وجود كميات كبيرة من المياه في المذنب. المذنبات في الحقيقة تصور على أحسن وجه باعتبارها جبال جليد فضائية قذرة — وكان من المعتاد تسميتها بأنها كرات ثلج قذرة، ولكننا نعرف الآن أنها أشد صلابة بكثير مما يطرحه ذلك الاسم. الكثير من القذر في المذنب هو مادة عضوية، مركبات كربونية، وعلى الرغم من أن هذا القذر يشكل فحسب نسبة صغيرة من كتلة المذنب، فإن المذنبات كبيرة جدًّا (مذنب هالي نفسه تقرب كتلته من ٣٠٠ مليار طن) بحيث إنه حتى تلك النسبة الصغيرة من كتلتها الكلية ستجمع معًا مادة كثيرة بالمعايير البشرية. وهذا فحسب من مذنب واحد.

لدينا عائلتان من المذنبات تتمايزان فقد عن طريق مداراتهما. هناك ما يسمى بالمذنبات ذات المدار قصير الزمن وتتحرك في مدارات إهليلجية تمتد عبر منطقة من المنظومة الشمسية هي تقريبًا المنطقة نفسها لمدارات الكواكب. وكمثل، فإن مذنب هالي يتحرك إلى الخارج بما يتجاوز قليلًا نبتون،

ثم يعود إلى الداخل تجاه الشمس ليقترب قليلًا من الزهرة، ويستغرق ما يقرب من ست وسبعين سنة ليستكمل المدار كله. لا يزيد المذنب في معظم وقت مداره عن أن يكون بالمعنى الحرفي كتلة ضخمة قذرة من الثلج، ولكنه أثناء مروره عن قرب من الشمس، يصبح ساخنًا بما يكفي لأن تتبخر المادة من سطحه وتنساب خارجة في ذيل طويل، وهذا هو الملمح المرئي المحدد للمذنب الذي أثر تأثيرًا بالغًا في أسلافنا. ستكون العودة التالية لهذا المذنب بالذات في ٢٠٦١، ومن المرجح أنها ستكون غير ملحوظة، لأنها ستكون في الجانب غير المناسب من المنظومة الشمسية حيث لا يتوفر له عرض جيد من الأرض، إلا أن مذنب هالي سيمر في ٢١٣٤ في نطاق ١٤ مليون كيلومتر من كوكبنا، وسيوفر لنا عرضًا رائعًا في السماء. يوجد الآن ما يزيد عن مائة مذنب معروف من ذوات المدار القصير الزمن قد تحددت مدارتها تحديدًا دقيقًا.

المذنبات ذات المدار طويل الزمن لها مدارات طويلة إلى حد أكبر كثيرًا، تأخذها إلى مسافات أبعد كثيرًا خارج الشمس. التمييز التعسفي بين المذنبات الطويلة والقصيرة في زمن المدار، اتُخذ تاريخيًّا عند فترة مدار من مائتي سنة، إلا أن هذا الحدث التاريخي فيه ما يضلل قليلًا. على الرغم من أنه قد حُددت بدقة مدارات أكثر من خمسمائة مذنب من الفئة ذات المدار الطويل الزمن، إلا أن التمييز المهم حقيقة هو التمييز بين المذنبات التي لها أي فترة مدار معروفة وتلك التي لها مدارات بالغة في الطول والنحافة بحيث يستحيل مطلقًا أن يُحسب لها أي فترة مدار مضبوطة. هذه مذنبات تظهر من أعماق الفضاء، وتنطلق سريعًا مرة واحدة حول الشمس، ثم تختفي ثانية إلى الأبد، في حدود ما يمكننا أن نعرفه.

تبين حسابات المدار أن كل المذبنات التي تُعرف فترة مدارها يمكن تفسيرها بأنها كانت فيما سبق مذنبات مدار فائقة الطول ثم تم أسرها لتقع في الفخ في منطقة الكواكب وذلك بواسطة التأثير الجذبوي للمشتري. إلا أن هذه الحسابات تبين أيضًا أن واحدًا فقط من كل مليون من هذه المذنبات «المتوحشة» يقع في الأسر بهذه الطريقة. في مقابل كل مذنب نراه بفترة مدار قصيرة مثل مذنب هالي، لا بد أنه كان هناك مليون زائر أتوا من

المناطق الخارجية للمنظومة الشمسية. وإذن فلا بد من أن هناك مستودعًا هائل للمذنبات في مكان في الخارج في الفضاء يوفر إمدادًا مستمرًا من الزوار للجزء الخارجي من المنظومة الشمسية، حتى يفسر وجود مئات المذنبات التي لها فترات مدار معروفة.

تبين الحسابات أن هذه المذنبات المتوحشة كلها لها مدارات بدأت خارج الشمس بما يقرب من ١٠٠٠٠٠ وحدة فلكية، أي بمسافة تبلغ حرفيًّا نصف مسافة بعد أقرب النجوم. (للمقارنة، أكبر مسافة يبتعد بها نبتون عن الشمس تزيد بالكاد عن ٣٠ وحدة فلكية). أدى هذا إلى نشأة الفكرة بأن الشمس محاطة بسحابة واسعة من المذنبات عند هذه المسافة، مستودع للمذنبات أصبح يعرف باسم سحابة أوبك-أورت، على اسم عالمي الفلك الرائدين لهذه الفكرة. ظل هناك مدة نصف قرن مجال للنقاش عما إذا كانت هذه السحابة موجودة حقًّا، وإذا كانت توجد بالفعل، فكيف حدث في المقام الأول أن وصلت المذنبات إلى هناك. على أنه منذ تسعينيات القرن العشرين حُسم هذا النقاش بالدراسات التي أُجريت للأقراص الغبارية حول النجوم الصغيرة السن مثل «بيتا بيكتوريس»، وبينت هذه الدراسات على نحو حاسم أن المذنبات هي حقًّا «في المقام الأول» عند الأصل من المنظومة الشمسية، وأن مستودع المذنبات قد غدا ممتلئًا.

محاكيات الكمبيوتر لتشكيل المنظومة الشمسية، التي تتضمن أن يوضع في الاعتبار وجود قرص مثل ذلك الذي يحيط ببيتا بيكتوريس، ويحوي كتلة تزيد عن كتلة الشمس نفسها، هذه المحاكيات تبين أنه على الرغم من أن معظم مادة القرص تضيع في الفضاء أثناء وصول المنظومة إلى الاستقرار، فإنه تبقى هناك كتلة من المادة مقدارها مئات عديدة من كتلة الأرض، أو أكثر من كتلة الكواكب كلها إذا جمعت معًا، وهذه الكتلة تبقى في شكل مذنبات. بعض هذه المذنبات تشكل قرصًا ممتدًا حول الشمس بما يتجاوز مدار نبتون، وبعضها له في أدنى حد مادة كتلتها مائة مثل للأرض وموجود في سحابة أوبك-أورت، هذه مادة تكفى لصنع ٢٠٠٠ مليار جرم بحجم مذنب هالي — وهي واقعيًّا مستودع لا يفنى بقدر ما يخص الشمس. لو حدث حتى أن عشرين من هذه المذنبات تهوى في كل سنة إلى الداخل تجاه

الشمس — وهذا معدّل يزيد كثيرًا عن المعدل الحالي — لكانت النتيجة عندها أنه أثناء حياة الشمس حتى وقتنا هذا لن يفقد المستودع إلا ٥ في المائة فقط من عدد المذنبات الأصلي.

المذنب النمطي في السحابة يدور حول الشمس بسرعة متمهلة مقدارها ١٠٠ متر في الثانية، أي أسرع من العَدَّاء الأولمبي بعشرة أمثال فقط، ويظل يفعل ذلك مليارات السنين. يحدث أحيانًا فقط بعض اضطراب في السحابة (ربما بتأثير جذبوي من نجم قريب، أو نتيجة بعض تفاعل بين مذنبين) ويؤدي إلى أن يجعل واحدًا أو أكثر من المذنبات ينحرف ثم يندفع إلى داخل المنظومة الشمسية، وهنا تندفع الأغلبية العظمى سريعًا حول الشمس، كسيارات تتحول إلى أعلى سرعة لمنحدر في سباق إندى ٥٠٠، وذلك قبل أن تعود للاختفاء خارجًا في الفضاء. يحدث فقط لواحد من كل مليون من هؤلاء الزوار أن ينحرف بواسطة المشتري إلى مدار بفترة قصيرة حول الشمس، أحيانًا يصطدم المذنب بالمشتري (كما في حالة مذنب شوميكر-ليفي٩ في سنة ١٩٩٤) أو يصطدم بأحد الكواكب الأخرى. تأثير الاصطدام بالأرض يعتمد على حجم المذنب، فمن الممكن أن يؤدي إلى كارثة محلية (ويبدو أن هذا هو ما حدث في منطقة تونجوسكا في سيبيريا في ١٩٠٨) أو أنه قد يؤدي إلى كارثة شاملة (ويبدو أن هذا هو ما حدث عند نهاية «العصر الطباشيري»[١٥] منذ ٦٥ مليون سنة، في وقت «موت الديناصورات». إلا أن المذنبات كما أنها تجلب الموت إلى الأرض، فربما تكون أيضًا قد جلبت لها الحياة.

من الواضح أن المذنبات تكونت من مادة بدائية هي من النوع النمطي لسحابة الغاز والغبار التي تكونت منها المنظومة الشمسية. يعني هذا أن من المرجح أنها تحوي كل المكونات التي تُرى في سحب «سجم» مضافًا إليها جزيئات أكثر تعقدًا لم نعينّها بعد في الفضاء. بما أن بعض الكويكبات تحوي مثلًا أحماضًا أمينية، سيكون مما يثير الدهشة ألا تحوي بعض

---

[١٥] العصر الطباشيري: الدور الثالث والأخير من حقب الحياة الوسطى، وكانت تكثر فيه الصخور الطباشيرية، كما انتشرت أثناءه الحيوانات الثدية البدائية وظهرت النباتات المزهرة، وبانتهائه منذ ٦٥ مليون سنة بادت الزواحف الضخمة والأمونيات (نوع من رأسقدميات ذات أصداف). (المترجم)

المذنبات على الأقل أحماضًا أمينية أيضًا. من الواضح كذلك أنه لا بد أنه كان هناك عدد من المذنبات أكثر كثيرًا مما يوجد حاليًّا، وهي تجول خلال الجزء الداخلي من المنظومة الشمسية عندما كانت صغيرة السن، وذلك مباشرة بعد تكوين الكواكب وقبل أن يرسخ كل شيء في حال مستقر. تبين المحاكيات التي ناقشناها فيما سبق كيف أنه في هذا الطور المبكر من تاريخ المنظومة الشمسية قُذف بالكثير من المذنبات إلى الخارج في الفضاء في حين أن عددًا مشابهًا هوى إلى الداخل تجاه الشمس، حيث جرفتها الكواكب. كما رأينا من قبل، يحمل وجه القمر الذي ناله القصف شهادة صامتة عن عدد الاصطدامات التي وقعت منذ ما يزيد قليلًا عن أربعة مليارات عام، وأيًّا كان ما قصف جارنا القمر فلا بد أنه قد قصف الأرض أيضًا. من المرجح جدًّا أن نسبة لها قدرها من مياه الأرض (وربما كل مياه الأرض) قد ترسبت على الكوكب أثناء هذا القذف، ومع هذه المياه أيضًا مواد مذنبية أخرى. من الممكن أن تكون المادة العضوية قد استطاعت أن تظل باقية بعد هذه الاصطدامات، على أنه ما من حاجة للتخمين بهذا الشأن، وذلك لأن هذه المادة سيكون لديها أيضًا ممر للنزول إلى الأرض على نحو ألطف بكثير من ذلك.

أكثر ملمح مميز للمذنبات هو أنها تفقد من مادتها عندما تمر بالقرب من الشمس. يمكن للمذنب أيضًا أن يتحطم لينكسر إلى قطع أصغر، ويقذف في هذه العملية قدرًا أكبر من مادته، وذلك إذا حولت حرارة الشمس المادة المثلجة في الداخل إلى غاز، ليتشقق المذنب ويتحطم إلى أجزاء منفصلة. بعد مرور زمن يدور فيه المذنب حول الشمس مرات قليلة، نجد أن المذنب ذا المدار القصير الزمن يخلف وراءه ذيلًا من الغبار بطول مداره كله، وعندما تمر الأرض من خلال ذيل ترابي كهذا نرى وابلًا من النيازك، خطوطًا من الضوء في السماء يسببها احتراق حبيبات الغبار في الجو. يحدث عرضان سنويًّا من هذه «الشهب»، في نوفمبر (وابل الليونيدات) وأغسطس (وابل البرسيدز). إلا أن بعض الحبيبات لا تحترق. الحبيبات الأصغر تهبط برفق خلال الجو وتصل سليمة إلى سطح الأرض.

بل حتى في وقتنا الحالي تتجمع حبيبات الغبار بهذه الطريقة لتسهم سنويًّا بما يقرب من ٣٠٠ طن من المواد العضوية الطازجة تضاف إلى

الأرض، في حين تسهم الكويكبات بما يقرب من ١٠ كيلو من المادة العضوية تبقى سليمة وقد أحاطتها بإحكام الأجرام الصخرية وهي تغوص خلال الجو. بعد أن انتهى مباشرة القذف الأولي لكوكبنا، فلا بد أنه كان هناك قدر أكبر كثيرًا من هذا الغبار هنا وهناك في الجزء الداخلي من المنظومة الشمسية. ثمة تقدير متحفظ يتأسس على المحاكيات السابق وصفها، مفاده أن ما يقرب من ١٠٠٠٠ طن من المادة العضوية قد جلبتها المذنبات إلى الجزء الداخلي من المنظومة الشمسية، إلا أن هذا يكون أساسًا من المواد الخالصة من سحب «سجم»، ويصل كل هذا سنويًا إلى سطح الأرض في ذلك الوقت. بمرور مائة مليون سنة أو ما يقرب، في حوالي الوقت الذي استغرقته الحياة لتصنع أول علاماتها على الأرض، يصل هذا بنا إلى قدر هائل من المادة العضوية — جزيئات متعددة الذرات تحوي الكربون. باعتبار وجود هذه الظروف لبدء الحياة، يكون من الصعب أن نتوقع أن تفشل الحياة في الوصول إلى إحكام قبضتها على سطح الأرض. يتبقى أن نسأل: تُرى ما مدى اقتراب المادة المذنبية من أن تكون حية قبل أن تصل حتى إلى الأرض؟

الوحدة الأساسية للحياة هي الخلية. تتضمن كيمياء الحياة جزيئات مثل البروتينات والأحماض النووية، وقد تم تجميعها من وحدات فرعية مثل الأحماض الأمينية والسكريات، ولكن هذه الكيمياء تجري فقط داخل جدار خلية يحميها، ويصنع لها درعًا واقيًا من البيئة الخارجية. لو كان هناك جزيئات شاذة من الدي إن إيه والبروتينات تطفو سائبة هنا وهناك في البحر، فلن يكون لها إلا فرصة قليلة جدًّا لأن يحدث لها بأي حال أن تجتمع معًا لتؤدي أشياء تصنع حياة مثيرة للاهتمام. من الواضح أن انبثاق الحياة قد اعتمد على وجود جزيئات أساسية وقد احتُبست بطريقة ما في موضع حيث يمكن أن يتفاعل أحدها مع الآخر. طُرحت اقتراحات كثيرة حول الموضع الذي ربما بدأت فيه الحياة — أحد الاحتمالات المثيرة هو أن الجزيئات الأساسية قد أُسرت في طبقات من مادة تشبه الطّفل. الاقتراح الذي سنصف وشيكًا خطوطه العريضة ليس بالوحيد، كما أنه لم تتم البرهنة عليه، ولكنه في الطليعة من السباق، ويتلاءم مع كل الحقائق المعروفة.

معظم الخلايا ضئيلة الحجم، وربما يكون قطرها عُشر أو واحد من المائة من المليمتر. يحوي جسدنا ما يقرب من مائة ألف مليار من هذه الخلايا — عدد يصل إلى مئات عديدة لمثل عدد النجوم اللامعة في درب التبانة — وكلها تعمل معًا لتجعلنا كما نحن، إلا أن الكائنات وحيدة الخلية مثل البكتريا تستطيع وحدها أن تدبر أمرها جيدًا بدون مساعدة. أهم ملمح في الخلية هو غشاؤها الذي يحيط بسائل مائي يعرف بالسيتوبلازم، حيث تقع أحداث كيمياء الحياة. هذا الحاجز ضد العالم الخارجي يبلغ سمكه فحسب عشرات معدودة من الجزء من المليون من المليمتر، وهو يسمح بدخول جزيئات معينة (هي أساسًا «الطعام») ويسمح بخروج جزيئات معينة (منتجات الفضلات). يختار الغشاء هذه الجزيئات على أساس حجمها وشكلها. حتى يسمح الغشاء للجزيئات المختلفة بأن تمر في الاتجاهين المختلفين فإنه لا يكون في شكل بنية متسقة مثل جدار طوب له ثقوب، وإنما يكون له «داخل» معين «وخارج» معين. أبسط أنواع الكائنات وحيدة الخلية يكون لخلاياها أقل بنية داخلية، ومن المعقول أن نفترض أن هذه تمثل الشكل الأولي، النوع الأصلي وحيد الخلية.

تُظهر أدلة الحفريات أن الكائنات المعقدة المتعددة الخلايا لم تظهر فوق الأرض إلا منذ حوالي ٦٠٠ مليون سنة، أي بعد ظهور الحياة وحيدة الخلية بثلاثة «مليارات» سنة. الكائنات من أمثالنا تطورت في وقت متأخر عن ذلك. على أننا نهتم هنا فقط «بأصل» الحياة، ومن ثم فإن هذه الكائنات البدائية وحيدة الخلية هي تلك التي نركز عليها. تحاط هذه الكائنات دائمًا بغشاء معقد كيميائيًا مصنوع من سلاسل طويلة (بوليمرات) من جزيئات تعرف بالسكريات الأمينية. هذه السلاسل متصلة إحداها بالأخرى بواسطة وحدات كيميائية أخرى (سلاسل قصيرة من الأحماض الأمينية تسمى ببتيدات) لتشكل شبكة تذكّر على نحو ما بكيس من الدوبارة. النقطة التي نريد أن نؤكد عليها هنا واضحة من اسم المركبات الموجودة — الوحدات الفرعية التي صنع منها جدار الخلية هذا هي أحماض أمينية وسكريات، وكلاهما مما يرجح أنه من مكونات السحابة التي تتشكل منها المنظومة الشمسية، وكلاهما مما يرجح أنه من مكونات غبار المذنبات.

في أواخر تسعينيات القرن العشرين وعند بداية القرن الحادي والعشرين أجرى علماء ناسا والباحثون في جامعة كاليفورنيا، بسانتا كروز، تجارب طرحت أنه يمكن أن تتشكل بنيات تشبه الغشاء في مصاحبة لحبيبات الغبار المثلجة التي توجد في سحب «سجم». صنع هؤلاء العلماء حبيبات ثلج بأن جمدوا مزيجًا غازيًّا من بعض أبسط المركبات التي يعرف أنها توجد في سحب «سجم» — ماء، وميثان، ونشادر، وأول أكسيد الكربون، مع إضافة أبسط كحول، الميثانول — جُمد هذا المزيج فوق مربعات صغيرة من الألمونيوم بردت إلى -٢٦٣° سلسيوس، بما يماثل طريقة تكوين طبقة من الصقيع فوق زجاج السيارة الأمامي في ليلة شتاء باردة. سُلطت على حبيبات الثلج بعدها الأشعة فوق البنفسجية، في محاكاة للإشعاع المنبعث من النجوم الصغيرة السن الساخنة. تضمنت النواتج النهائية لذلك مواد أكثر تعقيدًا من كحوليات، وآلدهيدات، ومركب عضوي كبير يعرف باسم هكسا ميثيلين تترامين. على أن الاكتشاف الدرامي حقًّا أتى عندما أتاح أفراد الفريق لهذه المادة أن تسخن في ماء سائل. وجدوا عندها أن بعض المكونات شكلت نفسها تلقائيًّا في كـرات جوفاء، تسمى حويصلات، عرضها بين ١٠-٤٠ جزء من المليون من المتر — أي ما يقرب من حجم كرات الدم الحمراء.

تفسير ذلك بسيط، بمجرد أن نفهم طبيعة بعض الجزيئات العضوية المركبة التي تنتج بتأثير الضوء فوق البنفسجي في حبيبات الثلج. هذه الجزيئات بالذات تسمى الأمفيفيلات (amphiphiles)، وهي تسلك بطريقة مماثلة للجزيئات النشطة في منظف للغسيل. لهذه الجزيئات بنية «رأس» و«ذيل» متمايزين، حيث الذيل يرده الماء بعيدًا بالتنافر بينما يجذب الماء الرأس. تأثير ذلك في منظفات الغسيل هو أن تندفن الذيول في حبيبات القذر، بحيث تحيط جزيئات المنظف بحبيبات القذر وتجعلها تطفو سائبة من المواد التي تغسل (بمساعدة من رجرجة قليلة). على أن جزيئات الأمفيفيلات لا يتاح لها ما تدفن ذيولها فيه، وهكذا فإنها في ظروف هذا الفضاء المحاكي تشكل طبقة مزدوجة، حيث الذيول عند الداخل والرءوس عند الخارج. هذه الطبقات تلتف بعدها منعقصة طبيعيًّا لتصنع كرات صغيرة مجوفة. وتمتص هذه الطبقات الضوء فوق البنفسجي، بحيث تصبح المناطق

الداخلية من الحويصلات ملاذات صغيرة يمكن أن تتواصل فيها عمليات الكيمياء بدون تدخل من الخارج.

التفسير المتحفظ لهذه الاكتشافات الجديدة هو أن الحويصلات من غبار المذنبات ستكون طافية هنا وهناك في مياه الأرض الصغيرة السن، وقد وُشيت بمواد عضوية أخرى من الفضاء، وأنه يحدث في بعض البرك الدافئة الصغيرة أن تنحبس أشياء مثل الأحماض الأمينية والسكريات داخل الحويصلات وتبدأ عمليات ستؤدي إلى الحياة. التفسير الأكثر راديكالية، والذي أفضله شخصيًّا، هو أنه في الداخل من الكتلة الثلجية للمذنب، التي تسخن بالاضمحلال الإشعاعي للنظائر قصيرة العمر الناتجة عن انفجار لسوبرنوفا، يحدث أن تتكون هكذا حويصلات في بريكات صغيرة وتصبح ممتلئة بجزيئات عضوية معقدة بما يرتقى إلى جزيئات الحياة ويتضمنها. بصرف النظر عن أي شيء آخر، فإنه بهذا المنوال يمتد الوقت المتاح لأن تخطو الكيمياء من اللاحياة إلى الحياة، فيتسع من المائتي مليون سنة التي تتاح فوق سطح الأرض إلى آلاف عديدة من ملايين السنين. حتى لو حدث بعدها أن تجمد المذنب في صلابة، فإن الحويصلات ستبقى مترقبة، جاهزة لأن تذوب وتسلم بذور الحياة إلى أحد الكواكب عندما تصبح جزءًا من مطر الغبار المذنبي في الجزء الداخلي من المنظومة الشمسية، وفي المنظومات المشابهة لها.

لا يزال يُنظر إلى هذه الأفكار على أنها فيها جسارة حتى في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. على أنه من الجدير بالملاحظة أن أول شخص طرح سيناريو من هذا النوع هو عالم الفيزياء الفلكية فريد هويل، في سبعينيات القرن العشرين. في ذلك الوقت كانت أفكار هويل تعد أساسًا مثيرة للسخرية، ولم يكن أقل الأسباب لذلك أن هويل هو وزميله شاندرا ويكراماسينغ قد ذهبا بأفكارهما إلى مدى بالغ في بعده واقترحا أن أمراضًا مثل الأنفلونزا ربما يكون قد جُلبت إلى الأرض حاليًّا بغبار المذنبات. على أنه يبدو الآن أن ما افترضه هويل فيه صواب أكثر من الخطأ، حتى وإن كان قد جرفه الحماس قليلًا.[١٦] هذه الفكرة بأن الخلايا قد أتت أولًا، ثم تبعتها

---

[١٦] ربما يُسمح لي بأن أهنئ نفسي بتربيتة صغيرة، فأذكر أني قلت الكثير من ذلك في كتابي «التكوين» المنشور في ١٩٨١.

الإنزيمات، ثم بعد ذلك فقط الجينات، هي فكرة لها أصول أطول، وترجع إلى أبحاث إيه إي أوبارين في عشرينيات القرن العشرين، وإن كان الاقتراح بأن أول الخلايا قد انبثقت في الفضاء قد أتى بعد ذلك بزمن طويل. يقال إن مصير أي فكرة جديدة في العلم هو أن يصرف النظر عنها أولًا على أنها سخيفة مضحكة، ثم تغدو نظرية جديدة ثورية، وأخيرًا ينظر إليها على أنها واضحة بذاتها،[١٧] ربما نكون في المرحلة الثانية من هذه المراحل ومفادها أن أصل الحياة نفسها هو في الفضاء العميق وأنها جُلبت إلى الأرض بواسطة المذنبات.

هذا هو أقصى الاحتمالات تطرفًا مما نُظر أمره جديًّا في وقتنا الحالي. إجابتي الشخصية عن سؤال «من أين أتى أصل الحياة؟» ستكون أنه «من المادة الثلجية لسحب «سجم»، في المادة التي تكونت منها بعد ذلك النجوم والكواكب». إلا أنه كعلامة زمنية تكون الإجابة «المتحفظة» في وقتنا هي أنه أتى «في بعض بركة صغيرة دافئة فوق الأرض، حيث يحدث أن الجزيئات العضوية المركبة التي جلبتها المذنبات إلى الأرض تتخذ الخطوة الحاسمة للوصول إلى التكاثر». في كلتا الطريقتين لا يوجد أي شك في أن كل الكواكب المشابهة للأرض سوف تُبذر بالنوع نفسه من المادة العضوية عندما تكون هذه الكواكب صغيرة السن. يعني هذا أن من المحتمل أن تكون الحياة شائعة عبر الكون، وأن الحياة كلها تتأسس على المكونات الأساسية نفسها، الأحماض الأمينية والسكريات، وإن كان من الممكن أن تستخدم الحياة في أماكن أخرى أنواعًا من الأحماض الأمينية والسكر تختلف عما في الحياة فوق الأرض. على أن إمكان وجود حياة «ذكية» في أماكن أخرى يُعد سؤالًا آخر، وهو يتجاوز نطاق هذا الكتاب. آخر سؤال كبير نود أن نواجهه هنا هو حقًّا السؤال الأخير — كيف سينتهي هذا كله؟

[١٧] أو كما طرح الفيلسوف الألماني آرثر شوبنهاور الأمر قائلًا: «تمر الحقائق كلها خلال ثلاث مراحل: الأولى هي السخرية منها. الثانية هي معارضتها بعنف. الثالثة هي تقبلها على أنها واضحة بذاتها.»

الفصل العاشر

كيف سينتهي هذا كله؟

بالحكم من الأدلة عن الحياة فوق الأرض — نوع الأدلة الوحيد لدينا — فإن الحياة ما إن تطبق بقبضتها على أحد الكواكب حتى تصبح مرنة إلى حد بعيد. التوقعات بالنسبة للحضارة البشرية تعتم عليها سحب الكثير من أوجه اللايقين التي نصنعها نحن بأنفسنا، بما في ذلك الحروب، وتغير المناخ بفعل الإنسان، وانحطاط البيئة.[1] التساؤل عما إذا كنا سنبقى أحياء بعد هذه المخاطر ليس موضوعًا للنقاش العلمي، ولكنه مسألة إرادة سياسية. هناك مثلًا أدلة علمية تفرض نفسها بقوة، ومن بينها أن الأنشطة البشرية تجعل العالم يزداد سخونة بمعدل غير مريح، ولكن التساؤل عما إذا كنا سنفعل أي شيء بهذا الشأن هو قرار سياسي. ويماثل ذلك أننا لدينا المعرفة العلمية والتكنولوجية لأن نوفر طعامًا كافيًا لعدد من السكان هو حتى أكبر من عدد السكان الذين تحملهم الأرض بالفعل، ولكن الناس يواصلون معاناة الموت جوعًا بأعداد كبيرة بسبب قرارات سياسية. على أنه أيًّا كان نتاج هذه القرارات، وأيًّا كان ما سيحدث للحضارة البشرية في غضون ما يلي من مئات قليلة من السنين (أو مئات قليلة من آلاف السنين)، فإن الحياة ستظل مستمرة. وعلى كل، فإن أقدم أشكال الحياة فوق الأرض، البكتريا وحيدة الخلية، ظلت موجودة هنا وهناك ما يقرب من أربعة مليارات سنة، وبقيت حية مع كل ما قذفته بها البيئة.

---

[1] أحد الكتب الجيدة التي تجعلنا نشعر بهذه المخاطر هو كتاب «قرننا الأخير» (٢٠٠٣) من تأليف مارتن ريس.

ومن المفارقات أن أكبر تهديد طبيعي لنوع حياتنا فوق الأرض قد يكون من العملية نفسها التي جلبت الحياة إلى الأرض في المقام الأول — الاصطدام بما يأتي من الفضاء. يبين السجل الجيولوجي أنه كانت هناك أحيان كثيرة حدث عندها أن أعدادًا كبيرة من الأنواع فوق كوكبنا (ليس مجرد أفراد، وإنما «أنواع» بأكملها) قد مُسِحت من على وجه الأرض فيما يسمى بالانقراضات، ولا بد من أن بعضًا منها كان مصاحبًا لاصطدام نيازك أو مذنبات بالأرض. أشهر هذه الأحداث من الانقراضات الجماعية «موت الديناصورات»، وقد وقع منذ ٦٥ مليون سنة، ومن المعتقد أن الاصطدام بنيزك قد لعب دورًا فيه (لعله الدور المهيمن). كان هذا هو آخر الانقراضات الخمسة الجماعية الكبرى التي حدثت بعد تطور أول سمكة. وقع أول هذه الانقراضات منذ ما يقرب من ٤٤٠ مليون سنة، والثاني منذ ما يزيد قليلًا عن ٣٦٠ مليون سنة، والثالث (وهو الأكبر) منذ ما يقرب من ٢٥٠ مليون سنة، والرابع منذ حوالي ٢١٥ مليون سنة. على الرغم من أن انقراض الديناصورات لم يكن الأكبر بين هذه الانقراضات، فإن هذا الحدث الذي وقع منذ ٦٥ مليون سنة (ويعرف باسم حدث العصر الطباشيري — الحقبة الثالثة،[٢] حسب اسم الفترتين الجيولوجيتين اللتين تفصل بينهما الكارثة) هو الحدث الذي نعرف أكثر الكثير عنه، لأنه أحدث انقراض وقع. مُسح من على وجه الأرض ما يزيد عن ٧٠ في المائة من كل الأنواع الحية وذلك عند نهاية العصر الطباشيري، ولو وقعت كارثة مماثلة حاليًّا فإنها ستؤدي بما يكاد يكون مؤكدًا إلى نهاية النوع البشري، ومعه أنواع أخرى كثيرة. بعض الأحداث الخمسة الأخرى الكبرى كانت حتى أكثر تدميرًا. ولكن النقطة التي نريد توضيحها هنا ليست في أن هناك أنواعًا كثيرة هكذا قد مُسحت من على وجه الأرض في مرات كثيرة هكذا أثناء تاريخ الحياة فوق الأرض، وإنما نريد أن نوضح أنه على الرغم من هذا، فإن الحياة بقيت مستمرة. تتطور أنواع جديدة وتتكيف مع الظروف الجديدة في أعقاب كل كارثة، وظل هذا

[٢] الحقبة الثالثة: حقبة تكونت فيها المجموعة الثالثة من الصخور الرسوبية التي بدأ ترسبها منذ حوالي ٦٥ مليونًا من السنين. (المترجم)

يحدث إلى ما يقرب من أربعة مليارات سنة. إذن فماذا يتطلب الأمر لإنهاء الحياة فوق الأرض؟

يبدو أن الأمر المؤكد الوحيد هو أن كوكبنا سيصبح غير قابل للسكنى (ولا حتى للبكتريا) عندما تنتفخ الشمس لتصبح عملاقًا أحمر وهي تقترب من نهاية حياتها. هذه عملية مفهومة جيدًا، وتعود بنا عودة حازمة إلى ما «نعتقد» أننا «نعرفه»، بأولى من أن تعود بنا إلى ما «نظن» أننا نعرفه.

الواقع أن النجوم الحمراء العملاقة تكتسب اسمها لأنها حمراء ولأنها كبيرة الحجم. كل النجوم التي تشبه الشمس ستعاني هذا المصير عندما ينفد وقودها النووي. طالما تبقى في قلب الشمس كمية من الهيدروجين تكفي لتوفير طاقة للحفاظ على تماسك طبقات النجم الخارجية ضد شد الجاذبية وذلك بتحويل البروتونات (نوى الهيدروجين) إلى نوى هيليوم بالطريقة التي وصفناها فيما سبق، طالما يبقى ذلك، فستظل كل أمور الشمس جيدة إلى حد معقول، وتظل الظروف مواتية للحياة على الأرض إلى حد معقول. (نقول إلى «حد معقول» فحسب لأنه أثناء هذه المرحلة الطويلة من حياة الشمس، تغدو الشمس بالفعل أسخن قليلًا، وربما يؤدي هذا إلى جعل الأمور غير مريحة لنوع حياتنا في مستقبل ليس بالبعيد جدًّا، ربما خلال مئات قليلة من ملايين السنين، حتى لو بقيت البكتريا على قيد الحياة). وعلى نحو عام، فقد بدأت الشمس وفيها وقود يكفي لاستمرار هذه العملية إلى ما يقرب من عشرة مليارات سنة، ونحن حاليًّا قد وصلنا تقريبًا إلى أقل من منتصف الطريق خلال هذه الفترة من الاستقرار الطويل المدى. هذه هي الأخبار الطيبة.

عندما ينفد وقود الهيدروجين في قلب نجم مثل الشمس، فإن النجم لا يستطيع بعد أن يحتفظ بتماسكه ضد شد الجاذبية، ومن ثم فإنه ينكمش. ولكن عندما ينكمش القلب، فإن هذا يطلق طاقة جذبوية تجعل القلب أكثر سخونة، وتؤدي هذه السخونة الإضافية من الأسفل إلى أن تجعل طبقات النجم الخارجية تتمدد في الفضاء. كنتيجة لأن قلب النجم قد أصبح أكثر سخونة، يفر المزيد من الحرارة من سطحه. إلا أنه بسبب تمدد النجم، فإن مساحة سطحه تزيد أيضًا، ويكون التأثير الخالص هو أنه على الرغم من

أن إجمالي كمية الحرارة التي تمر عبر كل سطح النجم قد زادت، فإن كمية الحرارة التي تمر عبر كل متر مربع من السطح تنخفض. ومن ثم فإن حرارة السطح تنخفض، حتى وإن كان المزيد من الطاقة يفر إلى الفضاء. هذا هو السبب في أن العمالقة الحمراء لونها أحمر، وليس أصفر أو أزرق. إلا أن هذه الممارسة الأولى لصفة العملقة لا تظل باقية إلى الأبد. الحرارة الإضافية في قلب النجم تؤدي إلى إشعال حريق في الهيليوم، لتندمج فيه نوى الهيليوم معًا فتصنع نوى الكربون. تتيح الطاقة المنطلقة تمدد القلب بعض الشيء ليبرد قليلًا، بينما تعاود الطبقات الخارجية الانكماش من حالتها التمددية.

عندما يُستنفد كل الهيليوم في القلب (الأمر الذي يستغرق فقط مائة مليون سنة، وهو زمن لا يقترب بأي حال من زمن مرحلة احتراق الهيدروجين أثناء حياة النجم) يحدث عندها مرة أخرى النوع نفسه من الأحداث. ينكمش القلب ويغدو أكثر حرارة بينما تتمدد الطبقات الخارجية أكثر، ويصبح النجم هكذا ماردًا فائقًا. آخر خط عمليات التركيب النووي في نجم كالشمس هو الكربون، أما عمليات بناء العناصر الأثقل فكما سبق أن رأينا تجري فقط في النجوم الأثقل كثيرًا من الشمس. على أن النجم الذي يقارب كتلة شمسنا يستطيع إلى فترة من الزمن الإبقاء على نفسه كعملاق فائق له قلب خامل من الكربون، وذلك بأن يحرق الهيدروجين في طبقة كالصدفة حول القلب ليتحول إلى هيليوم. يؤدي هذا على نحو مطرد إلى أن يجعل القلب أكثر كتلة واندماجًا، ولكن طبقات النجم الخارجية تواصل التمدد، وهي تفقد من مادتها في الفضاء. في النهاية عندما يتم استنفاد كل ذلك الوقود، يبرد النجم ويتقلص إلى قزم أبيض، خبث فرن نجمي له تقريبًا كتلة مثل شمسنا قد حُزمت في حيز لا يزيد عن حجم الأرض.

نجد في الكثير من الكتابات الشعبية التي تصف هذه العملية (بل حتى في بعض الكتب الدراسية التي ينبغي أن يكون لمؤلفيها معرفة أفضل) أنها تخبرنا بأن مصير الأرض هو أن تبتلعها الشمس عندما تصبح عملاقًا فائقًا أحمر، وذلك بعد ما يقرب من مرور ٧,٥ مليار سنة من الآن. تقدر هذه السيناريوهات أن نهاية الحياة فوق الأرض ستحدث خلال ما يقرب من

٥,٥ مليار سنة، عندما يصبح لمعان الشمس ضعف لمعانها الآن، فتحرق كوكبنا. إلا أن هناك خطأ يقع فيه مؤلفو هذه السيناريوهات، وهو أنهم في كل خطوة من حساباتهم يستخدمون كتلة الشمس الحالية، وعندما يجرون مقارنات مع الأرصاد ينظرون إلى نجوم، بما فيها العمالقة الحمراء، لها الكتلة نفسها الآن مثل الشمس. وهم لا يضعون في الاعتبار الطريقة التي تفقد بها الشمس من كتلتها وهي تزداد سنًّا، خاصة عندما تبدأ في التمدد. العملاق الأحمر الذي لديه الآن كتلة شمس واحدة لا بد أنه قد بدأ في أول أمره بكتلة أكبر من ذلك بما له قدره، والنجم الذي يبدأ بكتلة شمس واحدة سينتهي إلى كتلة أقل كثيرًا. بل حتى عند إجراء حساب تقريبي سيبين ذلك أن الأرض لن يحدث قط أن تبتلعها الشمس، وإن كانت الأرض لا يمكن لها أن تبقى صالحة كموطن للحياة عندما تأخذ الطبيعة مجراها، هناك تكهنات ناتجة عن معرفة أوفر قد أوضحت ذلك منذ زمن طويل. على أننا نستطيع الآن أن نصل حتى إلى ما هو أفضل. أجرى بعض زملائي في جامعة ساسكس حساب تنبؤات أدق عن مصير الشمس والأرض، وهي توفر أفضل مرشد إلى الآن عن مصير كوكبنا على المدى الطويل (شرودر، وسميث، وآبس، «تطور الشمس والمستقبل البعيد للأرض»).

تدور الأرض حاليًّا على مسافة من الشمس تقرب من ١٥٠ مليون كيلومتر (أو على وجه الدقة على بعد ١٤٩,٦ مليون كيلومتر من «مركز» الشمس، نصف قطر الشمس مقداره ١,٤ مليون كيلومتر، ومن ثم فنحن نبعد «فقط» بمسافة ١٤٨,٢ مليون كيلومتر من سطح الشمس). تبين الحسابات (والمقارنة مع النجوم العملاقة التي ترصد الآن في المجرة) أنه عندما تصبح الشمس أولًا عملاقًا أحمر، حتى بعد أن نضع في الاعتبار ما يُفقد من المادة، فإنها ستتمدد إلى نصف قطر من ١٦٨ مليون كيلومتر، وربما يبدو هذا كافيًا لابتلاع الأرض. إلا أنه بحلول ذلك الوقت ستكون الشمس قد فقدت قدرًا بالغ الكبر من كتلتها حتى إن قبضتها الجذبوية على الكواكب ستضعف هكذا بما له قدره، فتنجرف الأرض بعيدًا إلى مدار نصف قطره ١٨٥ مليون كيلومتر. يفقد الجزء الخارجي من الشمس قدرًا بالغًا من الكتلة (يصل إلى ٢٠ في المائة من كتلة الشمس الأصلية وذلك بحلول

الوقت الذي تصبح فيه نجمًا عملاقًا أحمر)، ونتيجة لذلك سيقل الوقود كثيرًا عما يلزم لدفع الهيدروجين إلى الاحتراق في الطور المتأخر من التمدد، والحقيقة أن الشمس نفسها لن تصبح أبدًا عملاقًا «فائقًا» — سيزيد نصف قطرها في المرحلة الثانية من التمدد ليصل فقط إلى ١٧٢ مليون كيلومتر، وهذا ليس أكبر كثيرًا عن المرحلة الأولى للعملاق الأحمر، ولا يزال غير كاف لابتلاع الأرض. بحلول ذلك الوقت، سيكون إجمالي الكتلة المفقودة ما يقرب من ٣٠ في المائة من كتلة الشمس في البداية، ويكون مدار الأرض قد تمدد إلى نصف قطر قدره ٢٢٠ مليون كيلومتر، أو ما يقرب من أن يزيد بخمسين في المائة عما هو عليه الآن. يكاد هذا أن يكون بالضبط حيث مدار المريخ الآن، على أن المريخ سيكون وقت ذاك قد اندفع خارج الشمس إلى مسافة أبعد.

بينما يجري هذا كله، يزداد لمعان الشمس في المرحلة الأولى من تمددها لما يصل إلى ٢٨٠٠ مثل لقيمة لمعانها حاليًّا، ثم يصل إلى ٤٢٠٠ مثل للمعانها حاليًّا عندما تتمدد للمرة الثانية وتغدو نجمًا عملاقًا. إلا أنه حتى عندما يصبح النجم عند أقصى درجة من الضياء، ستكون الحرارة عند السطح قد هبطت أكثر من النصف، فتنخفض من قيمتها الحالية وهي ٥٨٠٠ كلفن لتصبح فقط ٢٧٠٠ كلفن.

لا تقدم أي من التبصرات الجديدة أملًا كثيرًا للكوكبين الداخليين عطارد والزهرة. عطارد قريب قربًا بالغًا من الشمس حتى إنها ستبتلعه في وقت يسبق كثيرًا زمن وصول النجم إلى أقصى حجم له، أما كوكب الزهرة فعلى الرغم من أن مداره سيتمدد من مداره الحالي بنصف قطر ١٠٨ مليون كيلومتر ليصل إلى نصف قطر قدره ١٣٤ مليون كيلومتر بحلول الوقت الذي تصل فيه الشمس إلى أقصى حجم في أول مرحلة من التمدد؛ فإن هذا المدار الجديد يظل تحت سطح الشمس بثلاثين مليون كيلومتر. سرعان ما يؤدي انجراف الغازات في جو الشمس إلى أن يجعل كوكب الزهرة يدور لولبيًّا إلى الداخل متجهًا إلى هلاك ملتهب.

لا يزال مما ينظر أمره مدى طول الزمن الذي تستغرقه الأرض لتصبح ساخنة بما لا يصلح لنوع حياتنا، ولكننا نستطيع استخدام هذه الحسابات

لنضع إحدى المشاكل التي تواجه البشرية الآن في منظور كوني. من الثابت الآن تمامًا أن ظاهرة بيت النباتات (الصوبة) التي تحدث بفعل الإنسان هي ظاهرة من المرجح أن ترفع متوسط درجة الحرارة في كوكبنا بحد أدنى ٥ درجات سلسيوس بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين (والحقيقة أن هذا تقدير متحفظ). الزيادة التدريجية في حرارة الشمس وهي تزداد عمرًا ستنتج عنها السخونة نفسها عبر فترة من حوالي ٨٠٠ مليون سنة. وبكلمات أخرى، وبعد التقريب لأقرب رقم صحيح، نجد أن الأنشطة البشرية تزيد من سرعة العملية بعامل من عشرة ملايين. يطرح فريق ساسكس أن الأرض يمكن أن تعد غير قابلة لسكنى الأشكال الحية مثلنا نحن بحلول الوقت الذي تأخذ فيه المحيطات في أن تغلي، وسوف يحدث هذا فيما يقرب من ٥,٧ مليار سنة، إذا افترضنا أننا سنتوقف عن التدخل في اتزان الحرارة في كوكبنا.[٣] ربما يكون هذا وقتًا كافيًا لسلالتنا، أو (بما هو أكثر ترجيحًا) وقتًا كافيًا لأي نوع ذكي جديد ينشأ فوق الأرض، ليجد وطنًا جديدًا في الفضاء، على أن هناك حلًّا جزئيًّا آخر للمشكلة، ربما لن يؤخذ جديًّا، ولكنه يبين كيف يمكن للتأثيرات الصغيرة أن تتضايف عبر مقاييس الزمن الفلكية.

كما يعرف أي فرد له اهتمام باستكشاف المنظومة الشمسية باستخدام مجسات فضائية لا تحمل بشرًا، فإن هذه المجسات غالبًا ما تنال دفعة تعزيز في رحلاتها إلى الكواكب البعيدة بأن يتم إرسالها في مدار بشكل مسار «قذيفة المقلاع» حول أحد الكواكب الأخرى — ربما يكون الزهرة أو المشتري — بحيث تُستخدم جاذبية الكوكب في تعجيل سرعة المجس وهو في طريقه. بما أنه لا أحد يستطيع أن ينال شيئًا في هذا الكون بلا مقابل، فإن هذا يعني بالطبع أن الكوكب سيفقد قدرًا مناظرًا من الطاقة. ولكن حيث إن كتلة المجس الفضائي ضئيلة بالمقارنة بكتلة الكوكب، فإن هذا التأثير يكون بالغ الصغر إلى حد يمكن إهماله. تستطيع أن تقلب العملية

---

[٣] عندما يحدث هذا، لا ريب في أن العوالم الأبعد من الشمس، مثل يوروبا قمر المشتري الثلجي، ستصبح أكثر دفئًا وربما توفر ظروفًا ملائمة للحياة. ومن ثم فإن بعض علماء الفلك يقترحون أن البحث عن الحياة في الفضاء ينبغي أن يتضمن أبحاثًا على المنظومات الكوكبية حول النجوم تحت العملاقة، وليس فقط النجوم المشابهة للشمس.

وترسل مجسًّا فضائيًّا في مسار منحنٍ كالقذيفة عبر الكوكب وهذا يبطئ من سرعة مجس الفضاء ومن ثم يعطي للكوكب قدرًا ضئيلًا من الطاقة. ولكن ما هي النقطة المهمة في ذلك؟ حسن، لو كان «مجس الفضاء» كبيرًا بما يكفي وكان هذا الكوكب هو الأرض، فربما تكون هناك نقطة مهمة هنا.

سنذكر هنا شيئًا من باب الدعابة لا غير، ففي بداية القرن الحادي والعشرين أجرى فريق من الباحثين الأمريكيين حسابات عن مقدار الجهد المطلوب لتغيير سرعة الأرض في مدارها بطريقة تجعلها تتحرك تدريجيًّا إلى الخارج لتعوض الزيادة التدريجية في حرارة الشمس وهي تكبر في العمر. وجدوا أنه يمكن أداء هذه المهمة باستخدام التكنولوجيا الموجودة حاليًّا مع بعض تخطيط على المدى الطويل في حرص شديد جدًّا. تتطلب الحيلة اللازمة هنا أن نأخذ كويكبًا قطره يقرب من مائة كيلومتر (أي أكبر بخمس مرات من الكويكب الذي يُعتقد أنه قد أفنى الديناصورات) ونثبّت في هذا الكويكب موتورات صاروخية لتقوده في مدار يجعله يمر سريعًا عبر الأرض في المسار المنحنى لقذيفة يكون هو المسار المناسب بالضبط. يمكن لصخرة الفضاء هذه وهي في مدار إهليلجي طويل يمتد خارجًا عبر المشتري وزحل، أن تُدفع في مسار سريع عبر الأرض مرة كل ستة آلاف سنة أو ما يقرب، وهي في كل مرة ستعطي لكوكبنا دفعة قوية تحركه إلى الخارج بما يصل إلى كيلومترات قليلة. كما أن الكويكب عند الطرف الآخر من مداره سوف يكتسب طاقة من المشتري أو زحل، بما يبقيه في مداره الخاص ولكنه يقلص قليلًا من مدار الكوكبين. ستكون النتيجة الخالصة أن تكتسب الأرض طاقة من الكواكب الخارجية وتزحف باطراد إلى الخارج بعيدًا عن الشمس. من حيث المبدأ يمكن لذلك أن يُبقي كوكبنا كموطن مريح حتى تغدو الشمس عملاقًا أحمر.

لا يخلو هذا السيناريو من المخاطر — فبداية نجد أنه سيكون على صخرة الفضاء أن تقترب من الأرض في كل مرة تمر بها إلى مسافة على مدى ١٥٠٠٠ كيلومتر، وأي خطأ ضئيل هنا قد يؤدي إلى اصطدام كارثي. ولكن مع اعتبار أن سنة ٢٠٠٧ تشير فقط إلى العيد الخمسين لإطلاق أول

قمر صناعي من الأرض، سبوتنيك١، وأننا الآن لدينا بالفعل التكنولوجيا اللازمة لأداء هذه الحيلة، إذا اعتبرنا ذلك ربما سيحدث إذا بقينا بالفعل أحياء بعد القرن التالي أو ما يقرب، أن تكون ذريتنا في وضع يتيح أداء ما هو أفضل قليلًا من هذه الهندسة الكوكبية المعقدة.

إلا أنه على المدى الطويل جدًّا ستموت الشمس نفسها وتنتهي إلى قزم أبيض يواصل الابتراد. أما النجوم التي تبدأ بكتلة تزيد بما له قدره عن كتلة شمسنا فإنها قد تنتهي إلى نجوم أكثر اندماجًا هي نجوم النيوترون، حيث تُحزَم كتلة أكبر نوعًا من كتلة شمسنا في حيز حجمه مثل جبل كبير على الأرض أو تصبح ثقوبًا سوداء. كل شيء يموت. ما نعرفه عن المصير النهائي للكون أقل كثيرًا مما نعرفه عن بداياته، ولكننا «نظن» أننا نعرف ما سيحدث للمادة لو أن الكون استمر في تمدده إلى الأبد، وهناك بعض تخمينات مثيرة حول ما قد يحدث إذا لم يواصل الكون تمدده (وهي تخمينات لا تزال تتأسس على علم حقيقي، رغم كل طبيعتها التخمينية). لا مفر من أن تكون هذه الموضوعات المهمة أكثر الموضوعات اتصافًا بالتخمين فيما ناقشناه في هذا الكتاب، على أنها ليست تخمينية بدرجة أكبر مما كانت عليه الأفكار حول بداية هذا كله منذ زمن لا يزيد عن زمن حياة إنسان.

عندما نتحدث عن مصير المادة، فإننا نستطيع في الحقيقة أن نناقش فقط مصير المادة الباريونية، وذلك لأننا لا نعرف ما تكونه باقي مادة الكون. إذا استمر تمدد الكون زمنًا طويلًا بما يكفي، فسيتوقف تكوين النجوم في النهاية حيث ستكون كل مادة صنع النجوم قد تم استخدامها فيما عدا نذر بسيط. المقاييس الزمنية في هذه العمليات بالغة في طولها بحيث لا تكاد تستحق الاهتمام بتوضيحها توضيحًا لا لبس فيه، على أن هذه العملية ينبغي أن تتوقف خلال تريليونات (10^{12}) قليلة من السنين ابتداء من الآن — أي عندما يكون عمر الكون أكبر بما يقرب من مائة مثل للزمن الذي انقضى منذ الانفجار الكبير إلى الآن. ستذوي المجرات متلاشية عندما تصبح كل نجومها إما أقزامًا بيضاء (تبرد إلى ثقوب سوداء)، أو نجوم نيوترون، أو ثقوبًا سوداء. ستنكمش المجرات أيضًا، وسبب ذلك هو في جزء منه أنها ستفقد طاقة عن طريق الإشعاع الجذبوي، والسبب في جزء

آخر هو ما يحدث من مواجهات بين النجوم يتم فيها تبادل الطاقة (مثل تبادل الطاقة في المسار الجذبوي لقذيفة مقلاع) وهكذا فإن أحد النجوم يكتسب طاقة ويُقذف به في الفضاء ما بين المجرات، بينما يفقد النجم الآخر طاقة ويتحرك إلى مدار أضيق حول مركز المجرة. معظم المجرات تحوي بالفعل ثقوبًا سوداء في قلوبها، وسينتج عن هذه العملية أن تتنامى هذه الثقوب السوداء وتبتلع المزيد والمزيد من المادة.

بل حتى الباريونات التي تبقى موجودة بعد هذا المصير لن تستمر إلى الأبد. كما ناقشنا من قبل، فإن العمليات نفسها التي أتاحت تكوين الباريونات في الانفجار الكبير تفرض أن تصبح الباريونات غير مستقرة على المدى الطويل جدًّا. الجسيمات الباريونية النهائية هي البروتونات والإلكترونات (فحتى النيوترونات تضمحل إلى بروتونات، وجسيمات نيوترينو، وإلكترونات بمقياس زمني من دقائق)، والبروتونات نفسها لا بد أن تضمحل (حسب فهمنا الحالي لعالم الجسيمات) ويكون ذلك أساسًا اضمحلال لبوزيترونات وطاقة إشعاعية نشطة، بمقياس زمني $١٠^{٣٢}$ سنة أو أكثر. حيث إن هناك توازنًا بين كل ما في الكون من شحنة موجبة وشحنة سالبة، فإنه عندما يكتمل وقت هذه العملية، ربما في زمن يبلغ $١٠^{٣٤}$ سنة من الآن، ستكون كل باريونات الكون قد تحولت إلى جسيمات نيوترينو، وطاقة، وعدد متساوٍ من الإلكترونات والبوزيترونات. الإلكترونات والبوزيترونات بدورها يتحتم أن يلتقي أحدها بالآخر وتبيد في ومضة من أشعة جاما. ستظل هناك «مادة» باقية هنا وهناك في شكل ثقوب سوداء فائقة الكتلة، تُصنع من كل باقي الباريونات الأصلية، على أنه حتى الثقب الأسود لا يبقى إلى الأبد. يحدث من خلال عملية تُعرف بإشعاع هوكنج أن تتحول طاقة الثقب الأسود ببطء شديد إلى طاقة مشعة مضافًا إليها مقادير متساوية من الجسيمات ومضادات الجسيمات، وهذه نفسها سوف يلتقي أحدها مع الآخر لتبيد. (يحدث هذا بسرعة أكبر مع الثقوب السوداء الأصغر، وهكذا فإنها تكون قد انتهت منذ زمن طويل بحلول الوقت الذي تضمحل فيه البروتونات). بمرور ما يقرب من $١٠^{١٠٠}$ سنة، لو استمر الكون موجودًا إلى هذا الزمن الطويل، سيكون كل شيء قد تبخر عن طريق عملية هوكنج.

ولكن هل سيبقى الكون موجودًا لزمن طويل هكذا وهو لا يزال في شكله الحالي؟ يراهن ذوو الخبرة الآن على أنه لن يظل كذلك، وإن كان لا يوجد حتى الآن من له الخبرة الكافية لأن يقرر ماذا يكون المستقبل الأرجح من بين ثلاثة بدائل ممكنة.

حسب الصورة القديمة لعلم الكون — و«القديمة» في هذه الحالة تعني ما هو تقريبًا قبل سنة ٢٠٠٠ — فإن الكون ربما سيظل يتمدد إلى الأبد، ولكن ذلك سيكون بسرعة أبطأ وأبطأ، بما يتيح وقوع كل هذه العمليات من الاضمحلال والإبادة. إلا أن وجود الطاقة المظلمة، أو الثابت الكوني، يغير كل ذلك. أحد الملامح الأخرى في علم الكون القديم هو أنه ستكون هناك فرصة كافية لأي نوع ذكي موجود لأن يرصد مصير الكون. حجم الكون الذي نستطيع رؤيته هو بمعنى حقيقي حجم يتمدد بسرعة الضوء. المسافة التي نستطيع رؤيتها في الكون هي مسافة ما يمكن للضوء أن يجتازه في الزمان منذ الانفجار الكبير، وهذا الحجم للمكان (الفضاء) يتزايد كبرًا بمعدل سرعة الضوء. قد يكون هناك وراء هذا الحد مناطق للكون ترتد بعيدة عنا بمعدل أسرع من الضوء (ذلك لأن المكان (الفضاء) نفسه يتمدد، وليس بسبب أن هذه المناطق تتحرك خلال الفضاء بأسرع من الضوء)، ونحن لا نستطيع أن نعرف شيئًا عن هذه المناطق. مع استمرار تمدد الكون بسرعة تقل دائمًا — ولكن مع وجود «فقاعة الضوء» التي تتحرك دائمًا بعيدًا إلى الخارج بسرعة الضوء، حتى وإن كانت التجمعات العنقودية للمجرات قد تنتهي إلى أن تنفصل بمسافات هائلة — مع استمرار تمدد الكون هكذا فإنه كان من الممكن حسب الصورة القديمة تصور وجود أجهزة كشافات فائقة الحساسية ترقب الأحداث في تلك المجرات البعيدة إلى أن يتم اضمحلال المادة نفسها. إلا أن هذه الصورة لم تعد بعد قابلة للحياة.

نحن نعرف (أو على الأقل «نظن» أننا نعرف) أن تمدد الكون حاليًّا يتزايد في سرعته بسبب وجود الطاقة المظلمة. أبسط تفسير لهذه الأدلة هو أن هذا التمدد المتسارع مصحوب بثابت كوني هو حقًّا ثابت — بحيث إن كل حجم من الفضاء يكون فيه مقدار متأصل ثابت من الطاقة المظلمة

مصاحب له. هذا التفسير للتسارع تدعمه آخر الأرصاد (وقت كتابة هذا) للسوبرنوفات البعيدة، التي رُصدت في مشروع اسمه مشروع «مسح تراث السوبرنوفا». ظهرت في ديسمبر ٢٠٠٥ أول نتائج لهذا المسح وهي تتفق بالضبط مع فكرة أن تسارع الكون المتمدد يُساق حقًّا بالثابت الكوني، أو قوة «لامدا». إذا كان الأمر هكذا، فإن عمليات الاضمحلال والإبادة ستتواصل وهي إلى حد بعيد حسب الطريقة نفسها التي وصفناها فيما سبق، إلا أنه لن تكون هناك فرصة كبيرة لأن يدرسها الراصدون الأذكياء. يتسارع تمدد الكون باطراد، وبسبب ذلك لن يقتصر الأمر على أنه سينقل الحشود العنقودية للمجرات لتتجاوز سطح فقاعة الضوء (التي يشار إليها أحيانًا بأنها الأفق الكوني) بمعدل أسرع من قدرة فقاعة الضوء نفسها على التمدد، وإنما سيحدث هذا أيضًا بمعدل أسرع وأسرع مع مرور الزمن. من السهل جدًّا إجراء عملية حسابية بأنه لو كان تسارع الكون سيتواصل بالمعدل نفسه الذي نستطيع رؤيته الآن، فإن كل مجرة وراء «المجموعة المحلية» الصغيرة التي تنتمي إليها مجرتنا درب التبانة كعضو فيها، سوف تنتقل بعيدًا عن الرؤية خلال مائتي مليار سنة، بما يزيد قليلًا عن عشرة أمثال العمر الحالي للكون. سيظل ما تبقى من مجرتنا محاطًا بفقاعة من الفضاء المرئي يرتد فيها الأفق الكوني مبتعدًا بسرعة الضوء، إلا أنه لن يتخلف أي شيء يُرى في كل الكون «المرئي».

ولكن ماذا لو أن الثابت الكوني ليس في الحقيقة ثابتًا بأي حال؟ ماذا لو كانت كمية الطاقة المظلمة المصاحبة لحجم معين من الفضاء تتغير بمرور الوقت، وإما أن تصبح أكبر أو تصبح أصغر؟ أُجريت أرصاد للطريقة التي ترتد بها المجرات البعيدة مبتعدة عنا، وقد تكشفت هذه الطريقة بواسطة دراسات السوبرنوفا التي سبق وصفها هنا، وبواسطة دراسات لإشعاع خلفية الكون الميكروويفية، وأدت هذه الأرصاد إلى وضع قيود صارمة إلى حد بعيد حول مدى السرعة التي يمكن أن تتغير بها هذه المعلمات، إلا أن هذه القيود تفسح مجالًا لبعض التخمينات المثيرة.

أول إمكان هو أن قوة الطاقة المظلمة تتزايد بمرور الوقت. هناك منطق معين وراء هذا التخمين، وذلك لأنه سوف يفسر السبب في أن الثابت الكوني

هو الآن بالغ الصغر — إذا كان هذا الثابت قد بدأ كصفر وأخذ يكبر ببطء، فسيتحتم عليه أن يمر بمرحلة يكون فيها صغيرًا جدًّا. ولكنه لا يتوقف عند ذلك. تطرح هذه الفكرة رؤية درامية للمستقبل فيها تنويع إلى أقصى حد على السيناريو الذي وصفناه حتى الآن. في أقصى شكل متطرف لذلك، تطرح هذه الرؤية أننا بدلًا من أن نكون موجودين عند مرحلة مبكرة من حياة الكون، قد نكون بالفعل موجودين عند منتصف المسافة تقريبًا بين الانفجار الكبير وبين الوقت الذي سينتهي فيه الكون كما نعرفه، على أن الراصدين الأذكياء سيكون لديهم فرصة كافية لأن يرقبوا كيف يحدث هذا كله. يطلق على هذا السيناريو اسمًا دراميًّا هو «التمزق الكبير»، ويميل أنصاره إلى زيادة جرعة الدراما بأن يشيروا إلى طاقة مظلمة إضافية تجعل التمدد ينطلق بسرعة أسية وكأنه «طاقة شبحية». الواقع أنها نفس الطاقة المظلمة التي ناقشناها من قبل، وإنما هناك فقط المزيد منها.[4]

حسب هذه الصورة يكون لتمدد الكون انعكاس له هو نفسه، إذ إن التمدد يضغط الزناد لتنامى الطاقة المظلمة وتؤدي زيادة قوة الطاقة المظلمة إلى تسارع التمدد بمعدل هو أسرع. في الصورة التقليدية، يبقى الثابت الكوني صغيرًا، بحيث إنه في المنظومات مثل الشمس، والنجوم، ومجرة درب التبانة التي تبقى متماسكة معًا بواسطة الجاذبية، لا يكون هناك تمدد — فالجاذبية تتغلب على الطاقة المظلمة. أما حسب فكرة «التمزق الكبير»، فتمدد الكون هو الذي يسيطر في النهاية، فيتغلب أولًا على الجاذبية، ثم يتغلب على قوى الطبيعة الأخرى، بأصغر المقاييس. أقصى صورة متطرفة لهذا السيناريو، حسب ما تسمح به قيود الأرصاد، تطرح أن النهاية ستأتي تقريبًا بعد ٢١ مليار سنة من الآن. ولكن التمدد المنطلق يتنامى أسيا، وبسبب ذلك لن يحدث شيء درامي للغاية في معظم الوقت، ويكون كل النشاط العنيف مقصورًا على آخر مليار سنة من حياة الكون أو ما يقرب من ذاك.

---

[4] الطاقة الشبحية مفيدة أيضًا في سياق آخر. تستخدم «الثقوب الدودية» في الكثير من قصص الخيال العلمي مثل «ستارجيت» (بوابة النجوم)، وذلك باعتبار أن هذه الثقوب فيها طريق مختصر خلال المكان والزمان، وإن كان من غير المرجح أن يكون لها وجود في الكون الحقيقي؛ لأن الجاذبية سوف تتركها مغلقة. ولكن إذا كان هناك وجود للطاقة الشبحية، فربما تستخدم للإبقاء على الثقوب الدودية مفتوحة ضد شد الجاذبية.

كنتيجة لتسارع الكون، يتقدم الوقت الذي تتحرر فيه كل مجرات «المجموعة المحلية» من روابطها الجذبوية إحداها مع الأخرى ليكون ذلك في وقت يقرب من ٢٠ مليار سنة من الآن، أي بمقدار هو فقط عُشر الزمن الذي يستغرقه الوصول إلى هذه المرحلة بواسطة التسارع المتسق بالمعدل الحالي. هذا وقت قريب قربًا كافيًا لأن تظل مجرتنا باقية في الوجود كجزيرة في الفضاء يمكن إدراك وجودها، وإن كان من المرجح أنها سيزداد حجمها بما له قدره وأنها ستتغير بعملية اندماج مع مجرة أندروميدا المجاورة، أي مجرة المرأة المسلسلة (وتعرف أيضًا باسم M31). ستكون منظومتنا الشمسية بالطبع قد انتهى أمرها من زمن طويل، وإن كان من المعقول أن نتصور أنه ربما يكون هناك وقت ذاك بعض شيء يشبه منظومتنا الشمسية موجود في المجرة الفائقة التي يتزايد كبر عمرها، مع وجود كائنات ذكية فوق كوكب يشبه الأرض ويدور حول نجم يشبه الشمس. عندما تأخذ المجرة موطن هذه الكائنات في الانطلاق منفصلة إذ يتغلب تنافر الطاقة المظلمة على الشد الجذبوي بين النجوم، عندها ستكون هذه الكائنات على بعد ٦٠ مليون سنة، بما يماثل تقريبًا الزمن الذي انقضى منذ موت الديناصورات حتى وقتنا الحالي، إلا أنه وقتذاك ستبقى مسافة بعد الأفق الكوني وهي لا تزال تقرب من ٧٠ ميجا فرسخ نجمي (ما يقرب من ٢٣٠ مليون سنة ضوئية)، وهكذا سيكون هناك بعد «انتزاع» المجرة الوطن وقتًا يكفي لأن يصل الضوء من مجرات أخرى مجاورة (بواقي «المجموعة المحلية») ويكفي لأن يدرس الراصدون الطريقة التي نُفثت بها هذه المجرات منفصلة.

قبل النهاية بثلاثة شهور، سنجد أن كواكب هذه «المجموعة الشمسية» المستقبلية ستحلق متحررة من النجم الأب، وسيجد أي ممن ينجون من هذه الكارثة أن كوكب موطنهم نفسه سيتفجر إلى ذراته المكونة له عند زمن يقرب من ثلاثين دقيقة قبل لحظة الهلاك. سوف تتمزق الذرات إلى أجزاء في آخر $١٠^{-١٩}$ من الثواني، مخلفة فراغًا متمددًا مسطحًا بلا ملامح. ربما يكون هذا هو كل ما هناك — إنها نهاية الزمان. وربما تكون هذه مجرد الظروف التي ربما تقدح الزناد لمرحلة جديدة من التضخم. قد يكون من الممكن لا غير أن هذه الرؤية للمستقبل البعيد هي أيضًا رؤية للطريقة التي

بدأ بها الكون كما نعرفه. هذا تخمين خالص، إلا أن من المثير أن المصير الثاني البديل للكون يطرح ما فيه صلة أوثق بين بداية الزمان ونهاية الزمان. ويجري هذا باسم «الانسحاق الكبير»، وينبثق من أن هناك إمكان لأن تغدو الطاقة المظلمة بمرور الزمن طاقة أضعف وليست أقوى.

أول تغيير يبدو مشابهًا جدًّا للسيناريو القديم في القرن العشرين عن كون يظل يتمدد أبدًا وتذوى فيه المجرات لتتلاشى تدريجيًّا وتضمحل المادة. إذا انخفض الثابت الكوني تدريجيًّا إلى الصفر، سينتهي بنا الأمر إلى وضع يماثل إلى حد بعيد الوضع لو كان الثابت الكوني يظل دائمًا صفرًا منذ البداية. ولكن لماذا ينبغي أن يتوقف انخفاض الثابت الكوني عند الصفر؟ فيما يتعلق بالمعادلات الكونية، إذا كان من الممكن لشدة الطاقة المظلمة أن تنخفض من قيمة موجبة إلى الصفر، فإنها إذن يمكنها أن تواصل الانخفاض لتصل إلى قيم سالبة. وكما أن الطاقة المظلمة «الموجبة» تضاد الجاذبية وتؤدي إلى تسارع تمدد الكون، فبمثل ذلك تمامًا تضيف الطاقة المظلمة «السالبة» إلى قوة الجاذبية، فتؤدي أولًا إلى إبطاء تمدد الكون ثم تجعل الكون يتقلص بمعدل متسارع. إذا كان الحال هكذا، فإنه حسب أقصى معدل للانخفاض تسمح به الأرصاد حتى الآن، من الممكن أن نكون موجودين تقريبًا بالضبط عند منتصف المسافة من كل حياة الكون، بحيث إن التقلص النهائي للعودة إلى حالة المفردة يحل موعده بعد ١٢ إلى ١٤ مليار سنة من الآن (وإن كان من الممكن بما يساوي ذلك أنه ربما تتأجل نهاية الكون إلى ٤٠ مليار سنة من الآن).

لن يكون هناك أي شيء درامي للغاية يمكن أن يراه أي راصد ذكي يوجد هنا أو هناك في مجرتنا عند الوقت الذي يتحول فيه تمدد الكون ليصبح تقلصًا، ولكن التغير سيحدث توًّا في كل مكان من الكون. على أنه نتيجة لأن الضوء له سرعة محددة، سرعان ما سيرى الراصدون أنه بعد هذا التحول ستظهر المجرات القريبة إزاحة زرقاء بينما تظل المجرات البعيدة تظهر إزاحة حمراء، بعد ذلك سوف ينتشر «أفق الإزاحة الزرقاء» خلال الكون بسرعة الضوء. يستحيل أن نقول بالضبط متى سيحدث هذا التحول، وذلك لأننا ليس لدينا المعلومات الكافية عن الطريقة التي تتغير

بها الطاقة المظلمة (إن كانت تتغير بأي حال)، وعلى كل فإن الأمور لا تأخذ في أن تكون مثيرة للاهتمام إلا عندما يقترب الكون من «الانسحاق العظيم»، وهكذا فإن من المعقول مرة أخرى أن نسجل الترتيب الزمني للتطورات الرئيسية بلغة من الوقت المتبقي على وقوع النهاية، وهذا يمكن التعبير عنه على نحو ملائم بلغة من حجم الكون. على أنه في هذه الحالة، لن يبقى أولئك الراصدون الأذكياء أحياء ليروا الأمور المثيرة للاهتمام التي تحدث في آخر دقائق قليلة.

لا ريب في أننا لا نستطيع أن نرى أو نقيس الكون كله، وهو كون ربما يكون حقًّا لانهائيًّا. ولكن كنتيجة لأن كل شيء يتغير معًا، تكون التغيرات النسبية في الحجم متماثلة بالنسبة لأي منطقة من الفضاء يتم اختيارها، نستطيع أن نفكر بلغة من حجم الكون المرئي الآن، وننظر كيف أن هذا الحجم من الفضاء سوف يتقلص، وما الذي سيحدث داخله وهو يتقلص. سيتمكن الراصدون من أن يرقبوا تقلص الكون إلى زمن طويل من غير أن تتأثر بيئتهم تأثرًا مهمًّا. سوف يرون حشود المجرات العنقودية وهي تتهاوى الواحدة تجاه الأخرى وتندمج معًا، بل يحدث الاندماج حتى بين المجرات المفردة، بدون أي حياة في بعض مستقبل مفترض. تصبح الأرض غير مريحة. سيكون هناك تهديد للحياة على هذا الكوكب وهو لا يأتي من هذه التفاعلات العنيفة الهائلة وإنما يأتي من تصاعد بطيء متسلل في درجة حرارة إشعاع الخلفية، وهو إشعاع يظهر إزاحة زرقاء إلى طاقات تعلو وتعلو أثناء تقلص الكون. توجد مسافة بالغة الكبر بين النجوم في المجرة الواحدة حتى إنه عندما تأخذ المجرات في الاندماج، يكون من النادر أن يقع اصطدام بين النجوم المفردة. عندما يحل وقت بدء المجرات في الاندماج إحداها بالأخرى، ستكون درجة حرارة إشعاع الخلفية — درجة حرارة السماء — درجة لا تزيد عما يقرب من ١٠٠ كلفن. وفي ذلك الوقت، سيكون حجم الكون حوالي جزء من مائة من حجمه الآن.

من ذلك الوقت حتى الوقت الذي ينخفض فيه حجم الكون إلى النصف في ملايين قليلة من السنين، وينكمش الكون إلى جزء من الألف من حجمه الحالي، ستكون الحياة الكوكبية غير مريحة في أول الأمر، ثم تغدو صعبة،

وبعدها مستحيلة. سرعان ما تصل حرارة السماء إلى ٣٠٠ كلفن، بما يعلو عن درجة حرارة ذوبان الثلج، وتذوب عندها أي ألواح ثلج أو مثلجات[٥] كوكبية. مع تواصل ارتفاع درجة حرارة الإشعاع الكوني (يكاد يبدو أن من غير المناسب أن نسميه بعد بإشعاع «الخلفية»)، تبدأ السماء كلها في التوهج، ويكون لونها أولًا أحمر داكنًا، وبعد ذلك يصبح لونها برتقاليًّا، عندما تصل الحرارة إلى آلاف قليلة من درجات كلفن — بما يشابه درجة الحرارة عند سطح الشمس. مع غليان البحار متبخرة منذ زمن طويل ومع ما يحدث من فوضى في الجو إذ تتكسر الذرات بددًا لتتحول إلى بلازما من النوى والإلكترونات (فك الاتحاد)، مع كل هذا نجد أن الحياة كما نعرفها تغدو مستحيلة فوق هذا الكوكب وذلك بحلول الوقت الذي يصير فيه حجم الكون جزء من ألف من حجمه الحالي. ليس من باب الصدفة أن يقع فك الاتحاد هذا عندما يكون حجم الكون هو نفس ما كان عليه حجمه عند وقوع إعادة الاتحاد في الكون المتمدد، فهذا السيناريو هو ببساطة معكوس الانفجار الكبير.

كلما زدنا قربًا من «الانسحاق الكبير»، زادت سرعة تقلص الكون وارتفاع حرارته، حتى نبدأ في رؤية مرحلة كرة النار في الانفجار الكبير على نحو معكوس. عندما يصل الكون إلى جزء من المليون من حجمه الحالي يصل إلى ارتفاع بالغ في حرارته حتى إن النجوم تتفجر عند وصول الحرارة إلى ملايين عديدة من الدرجات، بما يشابه درجة الحرارة حاليًّا في داخل النجوم. عندما يصل الحجم إلى جزء من المليار من الحجم الحالي، تصل درجة الحرارة إلى مليار درجة، وعندها فإن النوى المعقدة مثل نوى الأكسجين والحديد التي تراكمت داخل النجوم بجهد هائل عبر مليارات السنين لا تلبث أن تُنفث متفتتة إلى مكوناتها من البروتونات والنيوترونات. عندما يصل حجم الكون إلى جزء من التريليون من حجمه الحالي تتفتت البروتونات والنيوترونات نفسها عند درجة حرارة تقرب من التريليون (10^{12}) درجة، لتتحول إلى حساء كواركات. سنكون الآن على مسافة ثوانٍ فقط من

[٥] المثلجة: تجمع جليدي كبير غير ثابت قد يتحرك في مجار تشبه الأنهار. (المترجم)

التقلص النهائي — أو من الوقت الذي تنهار عنده قوانين الفيزياء التي نعرفها ويحدث أمر رائع، إلا أنه لن يوجد أي أحد هناك ليراه.

إذن هل يكون ما سيحدث «انسحاقًا كبيرًا» أم هو «تمزق كبير»؟ قد يكون من الممكن أن نميز بين هذين الاحتمالين المتطرفين، أو على الأقل أن نضع قيودًا أكثر إحكامًا على ما يحتمل أن يحدث، نضعها في زمن من العقد الثاني للقرن الحادي والعشرين. هناك جهاز يسمى «التلسكوب الكبير الشامل لأبحاث المسح»، ربما (مع التفاؤل) سيبدأ تشغيله في ٢٠١٢، وهو مصمم لصنع قياسات بالغة الدقة والتفصيل للطريقة التي تتكتل بها المجرات معًا، وهو هكذا يوفر المعلومات الإحصائية الكافية لوضع قيود محكمة بشأن قوة الطاقة المظلمة، وربما بشأن الطريقة التي يتغير بها ذلك مع زيادة عمر الكون. كما أن هناك قمرًا صناعيًّا يعرف باسم «مجس تسارع السوبرنوفا Supernova Acceleration Probe»، وقد رتب له بمزيد من التفاؤل أن يحلق قبل ٢٠١٥، وسوف يوفر المعلومات عن آلاف السوبرنوفات في المجرات القصية البعد، بما يعطي قياسات عن الطريقة التي يتسارع بها تمدد الكون، أدق كثيرًا من القياساتالإنجليزية وفي أولها التي نستطيع صنعها حاليًّا.

في غضون ذلك، ليس لدينا غير تخيلاتنا لترشدنا. والفيزيائيون لحسن الحظ لديهم تخيلات خصبة، وقد ادخرت ما أفضله منها ضمن الحصاد الحالي للتخمينات عن الطريقة التي سينتهي بها هذا كله أخيرًا. ما أفضله هو الصورة الكاملة لنموذج كون التفجر الناري الذي ذكرناه فيما سبق. يقدم هذا النموذج الطاقة المظلمة بطريقة طبيعية، وهو يحوي عناصر من كل من «التمزق الكبير» و«الانسحاق الكبير» وقد وضعت في سياق دورة أبدية، بالمعنى الحرفي للكلمة، دورة من الميلاد، والموت، وإعادة الميلاد. ويتأسس النموذج على آخر الأفكار التي تتضمن نظرية إم والبرانات. لا يعني هذا أنه بالضرورة صحيح. إلا أنه حزمة قد رتبت معًا على نحو رائع. وهو يبين على نحو أوضح بكثير من أي مثل آخر إلى أين تذهب الفيزياء بالضبط في العقد الأول من الألفية الجديدة.

الشيء السيئ الوحيد في هذا النموذج هو اسمه. يأتي هذا الاسم من الكلمة الإغريقية التي تعني حريقًا هائلًا (ekpyrosis كما في pyrotechnics

وتعني الألعاب النارية، أو pyromania وتعني هوس الحريق)، وإذا كان هذا اسمًا مناسبًا من بعض النواحي، كما سوف نرى، إلا أنه ليس مما ينطلق به اللسان بالسهولة التي ينطلق بها مصطلح الانفجار الكبير وكل مصطلحات «الكبير» الأخرى. طرح البعض من نقاد هذا النموذج مصطلح «الاصطفاف الكبير»، الأمر الذي أثار شيئًا من الضيق عند أنصاره، فقد ذكّرهم بأن مصطلح «الانفجار الكبير» قد صاغه أحد نقاد نموذج الانفجار (فريد هويل) والتصق بعدها بالنموذج. إلا أن «الاصطفاف الكبير» يعطينا على الأقل صورة ذهنية عما يجري — ارتطام بين برانين تصفه معادلات نظرية إم. إذا توخينا الدقة في الكلام، فإن مصطلح كون التفجير الناري يُستخدم ليصف نموذجًا لارتطام وحيد بين برانين، ينتج عنه الانفجار الكبير، ولكنه الآن قد وُسع منه ليضم نماذج يتكرر فيها وقوع هذه الارتطامات في دورة بلا نهاية من الموت وإعادة الميلاد. ومن ثم فلعل «نموذج العنقاء»[٦] أن يكون هو المصطلح الأفضل.

كل بران يشارك في هذه الدورة يمكن تصوره بلغة من الفضاء باعتباره كونًا كاملًا لانهائيًا، بثلاثة أبعاد، مثل كوننا، ويشكل الزمان بعده الرابع. هذه البرانات أو الأكوان ينفصل أحدها عن الآخر ببعد فضائي رابع (إجمالًا البعد الخامس). كما هي العادة، سيكون مما يساعدنا أن نتصور أن البران المرادف ذا البعدين هو وجاره الذي ينفصل عنه ببعد فضائي ثالث، نتصورهما على أنهما يماثلان صفحتين متجاورتين في كتاب. كما سبق أن شرحنا، فإن كل ما هو مألوف من الجسيمات والقوى، كلها فيما عدا الجاذبية، تكون مقيدة بتحركها وفعلها داخل عالم بران واحد (كوننا)، إلا أن الجاذبية يمكن أن تتسرب من خلال البعد الخامس لتؤثر في الكون المجاور. بما أن العملية تجري دوريًا (وربما إلى مالانهاية)، فيمكننا إذن أن نبدأ في وصفها عند أي نقطة من الدورة. فيما يبدو فإن المكان المنطقي لذلك هو نقطة في الدورة تقابل النقطة التي اعتدنا أن نفكر فيها على أنها الانفجار الكبير — وذلك لأنها، كما سوف نرى، تناظر أيضًا نهاية الكون كما نعرفه.

---

[٦] العنقاء طائر خرافي يعّمر قرونًا، ثم يحرق نفسه ويعاد بعثه من رماده في أحسن شباب وجمال. (المترجم)

هيا نتخيل برانين يتقاربان بطول البعد الخامس، مثلهما مثل صفحتين من الورق جعلتا تقتربان معًا وجهًا لوجه. من منظور البران الخاص بنا، إذا كانت توجد كائنات ذكية هنا وهناك في ذلك الوقت ولديها أجهزة يمكن أن «تنظر» بطول البعد الخامس، فإنهم ببساطة سيرون البران الآخر وهو يقترب منهم، وكأن بران موطنهم (البران الخاص بنا) يظل واقفًا بلا حراك. ينجذب البرانان أحدهما إلى الآخر بطول البعد الخامس عن طريق قوى تعمل بطول ذلك البعد — هي أساسًا قوة الجاذبية الحقيقية بكامل قواها. لأسباب ستتضح لنا سريعًا فيما يلي، فإن كلا البرانين عند هذه المرحلة من الدورة سيكونان أساسًا فارغين ومسطحين إلى حد بعيد، وذلك من حيث منحنى الزمكان لديهما. إلا أنه لا يمكن لأي زمكان أن يكون مسطحًا «بالكامل»، وذلك بسبب تأثيرات كمومية، ومن ثم سيكون هناك أوجه عدم انتظام في كل من البرانين، أو ما يرادف التلال والوديان في سطح من بعدين. على الرغم من أن البرانين يقترب أحدهما من الآخر مثل صفحتين متوازيتين من الورق تصيران متلامستين، فإنهما سيتلامسان أولًا في الأماكن التي تكون فيها مقبات أو نتوءات في الغشاءين. ربما ستظن أن هذه الأماكن غير المنتظمة حجمها ضئيل وأنها تبدأ على هذا النحو، إلا أنه حسب معادلات نظرية إم، عندما يقترب البرانان معًا قربًا وثيقًا، ستُعمل قوى شديدة فعلها عليهما لتشدهما بقوة إلى التلامس وكذلك أيضًا لتضخم من المويجات الكمومية.

سينتج عن هذا أوجه عدم انتظام بكل الأحجام — ويقال عنها إنها «ثابتة القياس». سيظل بعضها في حجم أصغر من الذرة، وقد يكبر حجم بعضها بمثل حجم كل الكون المرئي حاليًا، كما قد توجد كذلك كل الاحتمالات ما بين هذين الطرفين. إلا أن أوجه عدم الانتظام التي تثير اهتمامنا هي تلك التي يكون لها عرض يقرب من المتر الواحد في الوقت الذي يصل فيه الغشاءان إلى التلامس، وذلك لأن العمليات الحسابية تبين أن هذه سيكون لها بالضبط الحجم المناسب لأن تنتج كونًا مثل الكون الذي نراه حولنا.

الأغشية لها ثلاثة أبعاد مكانية، وبسبب ذلك فإن أفضل طريقة لتصور هذا الحدث هي إن نتخيل حجمًا كرويًا للفضاء (المكان)، له قطر من متر

واحد أو ما يقرب، وكل نقطة فيه بحجم من ثلاثة أبعاد (كل نقطة بفضاء ثلاثي) تتلامس في التو مع كل نقطة في الفضاء الثلاثي للبران الآخر. ستكون النتيجة كرة نار من الطاقة تتمدد دراميًا في الفضاء الثلاثي الأبعاد للبران «الخاص بنا»، وتتنامى أسيًا، ولكن ذلك بمعدل يزداد بطئًا بمرور الزمن. نجد على نحو حاسم أن هذا «لا» يتضمن فترة من التضخم، وإن كان التمدد في البداية يتصف بأنه تمدد درامي تمامًا بالمعايير الحالية. سيتضاعف حجم الكون في أول الأمر مرة كل $١٠^{-٢٠}$ ثانية، ولكن معدل التمدد سيبطئ بحيث إن زمن التضاعف يصبح وقت ذاك بالتقريب مرة كل $١٠^{١٠}$ سنة، سيقل مرة أخرى زمن التضاعف في المستقبل إذ تسرّع الطاقة المظلمة من تمدد الكون. عمومًا، فإنه حسب هذا السيناريو سينمو الكون بعامل أكبر من $١٠^{٢٠}$ (مائة مليار مليار) أو حتى $١٠^{٣٠}$ من «مولده»، الأمر الذي يفسر التسطح البالغ لكوننا بالطريقة نفسها التي يفعل بها التضخم ذلك.

حسب هذه الصورة، يكون كوننا بأكمله قد تمدد من تلك الكرة النارية التي يبلغ عرضها مترًا واحدًا. إلا أنه أثناء عملية الاصطدام نفسها، تكون قد انطبعت على الزمكان مجموعة ثانية من المويجات الكمومية، لتنتج المويجات في إشعاع خلفية الكون الميكروويفية وتوفر البذور التي يمكن أن تنمو عليها الحشود العنقودية للمجرات، بما يماثل تمامًا الصورة المعيارية للتضخم. إلا أن من الأمور الحاسمة أنه لا توجد وحدها عند بدء الزمان، «وكوننا» لم يكن عرضه بأي حال أقل من المتر، ولم يختبر قط كثافة لانهائية، وهو «يبدأ» بالفعل عند درجة $١٠^{٢٤}$، وهذا الرقم وإن كان كبيرًا إلا أنه لا يزال متناهيًا. هذا هو أحد الأسباب الرئيسية في أن الكثيرين من علماء الكونيات يرون أن هذا النموذج جذاب. ويعني هذا أيضًا أن «كوننا» ليس فريدًا، حتى وإن كنا نفكر فقط بلغة من البران الخاص بنا. لا بد أن هناك مناطق كثيرة أخرى من البران (كثيرة إلى مالانهاية، إذا كانت البرانات لانهائية) قد وصلت إلى التلامس وتولد منها أكوان متمددة على هذا النحو. ولكنها ستظل أبدًا وراء أفق فقاعتنا المرئية للفضاء المتمدد، وذلك لأن خامة الغشاء بين الأكوان تتمدد هي الأخرى بمرور الزمن. وهي تتمدد بسبب الطريقة التي يرتد بها الغشاءان أحدهما بعيدًا عن الآخر بعد اصطدامهما.

تخضع الأغشية الأخرى لمصير يختلف قليلًا عن ذلك بعد أن يرتد البرانان لينكص أحدهما بعيدًا عن الآخر وتبدأ تتحرك منفصلة بطول البعد الخامس. حسب هذا النموذج يكون البعد الإضافي منبعجًا بحيث إنك لو تحركت بطول البعد الإضافي في اتجاه واحد يتزايد حجم الأبعاد المكانية الثلاثة المألوفة، في حين أنك لو تحركت في الاتجاه الآخر سيقل حجم هذه الأبعاد الثلاثة المألوفة. عندما ترتد البرانات لتنكص بفعل الاصطدام، يتفق أن كوننا يتحرك في اتجاه تمدد الفضاء الثلاثي. بداية، يرتد الكون المجاور على النحو الآخر بطول البعد الخامس وينكمش. إلا أن قوة الجذب بين البرانين (قوة الجاذبية الحقيقية) تكون بالغة الشدة حتى إن البران الثاني يتحول ملتفًا وراء براننا، بحيث إنه سرعان ما يأخذ في التمدد كذلك. هكذا فإن البرانين يمر كل منهما من خلال عملية التمدد، والترقق، واضمحلال المادة، وهي العملية التي وصفناها لكون يتمدد أبدًا، إلا أنهما لا يتلامس أحدهما مع الآخر طوال كل ذلك الوقت — وهو وقت يقاس بترليونات السنوات (مضاعفات ١٠^١٢). مسافة انفصال البرانين تكون ضئيلة بأي معيار بشري — ربما آلاف قليلة من طول بلانك، أي ١٠^-٣٠ سنتيمتر (وهذا أصغر كثيرًا من قطر البروتون)؛ وكما يقال فإن الانفصال بأقل طول هو مثل الانفصال بأميال. إلا أنه بفضل من القوة ما بين البرانات، وكذلك بفضل من أن البرانين يصيران خاويين ومسطحين، فإن هذا يبقيهما كل الوقت متوازيين أحدهما مع الآخر.

طول معظم ذلك الوقت «يحوم» البرانان وهما منفصلان بالمسافة نفسها تقريبًا. إلا أنه يحدث تدريجيًا أن قوة الجذب ما بين البرانين تتغلب على الطاقة الحركية التي أضفاها الارتداد، فتجذب البرانين معًا ثانية. تبدأ هذه العملية في الحقيقة بسرعة بطيئة جدًا جدًا، ولكنها تتزايد دراميًا مع تقارب البرانين معًا أقرب وأقرب. بخلاف ما يحدث عندما توجد قوة تشد زنبرك ممطوط ليعود ثانية إلى حجمه الطبيعي، فإن قوة الجذب بين البرانين تكون عند تقاربهما معًا أقوى كثيرًا مما تكونه وهما منفصلان بآلاف قليلة من طول بلانك. البرانان أنفسهما (وهما الآن يتكونان أساسًا من مكان-زمان خاوٍ ومسطح) يتقلصان قليلًا أثناء هذه المرحلة من الدورة،

ولكن ذلك يكون فقط بعامل ١٠ أو ما يقرب (بالمقارنة بعامل ١٠^٣٠ الذي تمددا به أثناء مرحلة التمدد)، وتكبر المويجات الكمومية في زمكانيهما بكل المقاييس، بما في ذلك مقبات بحجم يقاس بالمتر.

طاقة الانفجار الكبير تأتي مباشرة من الطاقة الحركية لحركة البرانين وهما يرتطمان،[٧] بمثل ارتطام الصنج، ونتيجة لطريقة انتشار الجاذبية منبسطة في البعد الخامس، فإنه مع انكماش المسافة بين الغشاءين في هذا الاتجاه تزيد القوة الفعالة للجاذبية نفسها في كل من البرانين — يعني هذا أنه عند «لحظة الانفجار الكبير» في كوننا، عندما كان قطر الكون مترًا واحدًا، يكون ثابت نيوتن الجذبوي أكبر مما هو عليه الآن. ولكنه يهوى منخفضًا إلى قيمته الحالية خلال جزء من الثانية.

هكذا نكون قد أكملنا الدورة، وهذه هي النقطة التي دخلنا عندها. وينتج عن هذا النموذج الصورة نفسها بالضبط للكون الذي نعيش فيه حسب الانتفاخ المعياري بنموذج «لامدا المادة المظلمة الباردة ΛCDM»، بما في ذلك طبيعة إشعاع الخلفية، ولكن ذلك بدون اللانهائيات التي تشكل الملمح المزعج لذلك النموذج. المادة المظلمة اللازمة لتفسير سلوك المادة المرئية في كوننا يمكن أن تكون جسيمات ضعيفة التفاعل في كوننا، أو تأثيرًا من الجسيمات الموجودة على الغشاء الآخر إذ تتسرب إلى غشائنا، لا يميز هذا النموذج بين الاحتمالين. إلا أن الطاقة المظلمة التي تجعل تمدد الكون يتسارع حاليًا هي ملمح أساسي في هذا النموذج. الكثافة المتوسطة للكون، ودرجة الحرارة، وكل الخصائص الفيزيائية الأخرى للكون تكون متماثلة عند كل انفجار (لكل كرة نار بحجم المتر) وتحدث عند النقط المتناظرة في كل دورة، الكون يعيد لا غير ملء نفسه في كل مرة، حتى وإن كانت التراوحات الكمومية نفسها تختلف إحصائيًا في كل دورة، وذلك لأن كل انفجار يكون مصحوبًا بتراوح كمومي واحد. إلا أن الظروف التي تجعل الكون بما هو عليه حاليًا قد تم طبعها عند نهاية مرحلة التقلص في الدورة السابقة، وليس عند بداية مرحلة التمدد الحالية.

---

[٧] نتيجة لأنه لن تفقد أي طاقة في العملية (فلا يوجد أي مكان تذهب إليه!)، فإن طاقة الارتداد تكون مماثلة لطاقة الارتطام، وهذا هو السبب في أن الدورة تستطيع أن تتكرر إلى مالانهاية. وبمعنى ما لا تتضمن العملية أي احتكاك يشتت الطاقة.

ثمة فارق رهيف، ولكنه مهم، بين نموذج «العنقاء» ونموذج التضخم. النموذج المعياري الذي يتضمن التضخم يتنبأ بأن الكون ينبغي أن يمتلئ بإشعاع جذبوي يترك انطباعًا على خلفية الكون الميكروويفية. نموذج «العنقاء» يتنبأ بأنه لن يكون هناك أي تأثير من موجة جذبوية من هذا النوع قابل للرصد في خلفية الكون الميكروويفية. على الرغم من أن مجسات الفضاء القادرة على قياس إشعاع الخلفية بالدقة اللازمة لا يرجح أنها ستحلق قبل ٢٠٢٠ بوقت كثير، إلا أن هذا يعني بالفعل أن هذه الفكرة مثل كل الأفكار العلمية الجيدة يمكن اختبارها بالتجربة.

السيناريو الذي يفضله القارئ من بين هذه السيناريوهات عن كيف سينتهي كل هذا، هو حاليًا وعلى نحو كلي مسألة اختيار. حتى الآن في ٢٠٠٥ ليس لدينا تجارب أو أدلة أرصاد تميز بينها. من المؤكد أن هذا سيتغير في مستقبل ليس بالبعيد جدًا، على أني شخصيًا أفضل نموذج «العنقاء» لأكوان لها دورات أبدية حيث الموت يعقبه دائمًا إعادة الميلاد. وكما يتفق فإن نموذج «العنقاء» يتردد فيه صدى لرؤية تعود إلى الوراء لما يزيد عن مائتي سنة، صورة كلامية رسمها إرازموس داروين، جد تشارلز داروين، في تصويره لتخمينات علمية في كتابه «الحدائق النباتية»، الذي نشر لأول مرة في ١٧٩١:

> هيا تدحرجي أيتها النجوم! جذلة في ريعان الشباب،
> لتسِمي بالأقواس اللامعة خطى الزمان الكليلة،
> هيا لتقترب عرباتك المشعة أقرب وإلى ما هو أكثر من الأقرب،
> وتتعدى مدارات متصاغرة على مدارات متصاغرة — أي زهور السماء! أنت أيضًا لا بد أن تستسلمي للشيخوخة،
> وتذوي مثل شقيقاتك في الحقل!
> يندفع النجم وراء النجم من قوس السماء العالي،
> وتغوص شموس في شموس، وتسحق المنظومات منظومات،
> وتندفع برأسها، لتفنى هاوية إلى مركز واحد مظلم،
> الموت، والليل، والفوضى تمتزج كلها معًا!
> حتى يحدث من فوق الحطام، وانبثاقًا من العاصفة،

أن تعلو الطبيعة الخالدة بشكلها المفعم بالتغبر،
وترتفع من محرقتها الجنائزية بأجنحة من لهب،
وتحلق وتسطع، كشيء آخر ولكنه مماثل.

من المؤكد أن الصورة تشبه «الانسحاق الكبير» التقليدي إلى حد أكثر من مشابهتها للكون الحديث ذي الدورات، ولكنها ليست بالصورة السيئة بالنسبة لتخمين من القرن الثامن عشر. وإذا لم يكن هناك أي سبب آخر، فإنها على الأقل مكنتني من أن أنهي كتابي من حيث بدأت القصة — في بدايتها الأولى.

مسرد المصطلحات

المادة المضادة Antimatter: صورة مرآة للمادة تكون فيها الخواص مثل شحنتها الكهربائية مضادة لخواص جسيمات المادة العادية. مثال ذلك أن جسيم المادة المضادة المناظر للإلكترون له شحنة موجبة وليست سالبة.

الوحدة الفلكية Astronomical unit: وحدة للمسافات يستخدمها الفلكيون، وتساوي متوسط المسافة بين الأرض والشمس.

أكسيون Axion: جسيم افتراضي تحت ذري ربما يسهم بقدر كبير في إجمالي كتلة الكون.

باريونات Baryons: كيانات نعدها عادة «جسيمات»، وهي جسيمات تحت ذرية ثقيلة نسبيًّا مثل النيوترونات والبروتونات، ولكن ليس الإلكترونات.

اضمحلال بيتا Beta decay: عملية يقذف فيها أحد النيوترونات إلكترونًا ويتحول إلى بروتون.

ثقب أسود Black hole: تركيز للمادة في منطقة في الزمكان لها جاذبية قوية جدًّا تؤدي إلى انحناء الزمكان حول نفسه، ولا يستطيع أي شيء أن يفر من هذه المنطقة حتى الضوء.

إزاحة زرقاء Blueshift: تناقص طول موجة الضوء في طيف جرم يتحرك مقتربًا من الراصد.

البوزونات Bosons: عائلة الجسيمات المصاحبة لما نسميه عادة بالقوى، مثل الكهرومغناطيسية. وبوزونات دابليو W وزد Z تنقل القوة النووية الضعيفة.

كوارك قاع Bottom: اسم يعطى لخاصية للكواركات، وهي عكس كوارك قمة.

الكوارك الساحر أو الفاتن Charm: إحدى صفات الكوارك، وهي عكس «الغريب».

الفيزياء الكلاسيكية Classical physics: علم الفيزياء الذي يطبق على الأجرام ذات المقاييس الكبيرة، التي تكون أكبر من حجم الذرات.

المادة المظلمة الباردة (ممب) Cold dark matter (CDM): مادة معروفة بأنها تسهم بنسبة كبيرة في كتلة الكون، ولكنها ليست في شكل باريونات ولبتونات. لا يعرف أحد حتى الآن كنه هذه المادة بالضبط.

كثافة حرجة Critical density: كثافة يكون عندها الزمكان في الكون مسطحًا.

الطاقة المظلمة Dark energy: صورة من صور الطاقة تملأ الكون، وهي مسئولة أساسًا عن جعل الزمكان مسطحًا. لا أحد يعرف حتى الآن كنه الطاقة المظلمة على وجه التحديد، إلى جانب أنها قد تكون مسئولة أيضًا عن تسارع تمدد الكون.

ظاهرة دوبلر Doppler effect: اسم عام للإزاحة الزرقاء والإزاحة الحمراء.

(كوارك) سفلي Down: اسم يعطى لصفة في الكواركات، وهي عكس الكوارك العلوي.

إلكترون Electron: جسيم ذري يحمل شحنة كهربائية سالبة، وتوجد معظم الإلكترونات على كوكب الأرض مرتبطة بالذرات، إلى جانب البروتونات والنيوترونات.

إلكترون فولت Electron volt (eV): وحدة يستخدمها فيزيائيو الجسيمات لقياس الكتلة والطاقة. وكتلة البروتون مقدارها تقريبًا جيجا إلكترون فولت.

فرميون Fermion: جسيمات تتكوّن منها المادة العادية. اللبتونات والباريونات هي فرميونات.

مجال Field: منطقة تأثير إحدى القوى مثل الجاذبية أو الكهرومغناطيسية.

مجرة Galaxy: عندما تكتب الكلمة الإنجليزية وفي أولها "g" صغيرة، فإنها تعني أي مجرة من مئات المليارات من المجرات في الكون، وعندما تكتب الكلمة الإنجليزية وفي أولها "G" كبيرة فإنها تعني مجرتنا درب التبانة.

جيجا إلكترون فولت Giga electron volt (GeV): (أو مليار إلكترون فولت) وهي تقريبًا كتلة البروتون أو ذرة الهيدروجين.

النظرية الموحدة الكبرى Grand Unified Theory (GUT): أي نظرية (وأميل إلى مصطلح «نموذج») تهدف إلى توحيد وصف جميع قوى الطبيعة — فيما عدا الجاذبية — في حزمة رياضية واحدة.

جرافيتينو Gravitino: النظير السوبرسيمتري للجرافيتون.

جرافيتون Graviton: جسيم يرتبط بالجاذبية، وينتمي إلى عائلة البوزونات.

مجال هيجز Higgs field: مجال افتراضي يعتقد أنه يملأ الكون كله، ويعطي الجسيمات كتلة.

التضخم، الانتفاخ Inflation: نموذج شائع للكون المبكر جدًّا يفسر الكثير مما يلاحظ من سماته نتيجة للتمدد السريع جدًّا (تمدد أسي) للزمكان في أول جزء من الثانية من الزمان.

التفاعل Interaction: مصطلح يستخدمه الفيزيائيون للإشارة إلى قوى الطبيعة.

كاوونات (ميزونات كيه) Kaons (K-particles): عائلة من ثلاثة بوزونات تظهر خصائصها أن هناك لاسمتريات صغيرة في قوانين الفيزياء، وهذه اللاسمتريات تتيح وجود المادة.

كيلو إلكترون فولت keV: ألف إلكترون فولت.

K meson: Kaon

لبتونات Leptons: عائلة من الجسيمات تضم الإلكترونات والنيوترينوات.

سنة ضوئية Light year: المسافة التي يقطعها الضوء في سنة واحدة؛ أي أنها مقياس للمسافة وليست مقياسًا للزمن.

زمن النظرة إلى الوراء Look-back time: الزمن الذي يستغرقه الضوء ليصلنا من جرم بعيد. إذا كانت إحدى المجرات تبعد عنا عشرة ملايين

سنة ضوئية، فإننا نراها بواسطة الضوء الذي بدأ رحلته منذ عشرة ملايين سنة. كلما نظرنا إلى أبعد في الكون، يكون ما نراه أكثر بعدًا للوراء في الزمن.

ميزونات Mesons: مجموعة فرعية من البوزونات.

ميجا إلكترون فولت MeV: مليون إلكترون فولت.

الميون Muon: نظير للإلكترون أثقل منه وزنًا.

نيوترينو الميون Muon neutrino: نظير ثقيل للنيوترينو، وإن كان لا يزال خفيفًا.

نيوترالينو Neutralino: جسيم صغير متعادل تتنبأ به نظرية السمترية الفائقة، ويعد المصطلح اسمًا عامًّا لنوع وليس جسيمًا بعينه.

نيوترينو Neutrino: لبتون خفيف جدًّا غير مشحون.

نيوترون Neutron: جسيم ثقيل نسبيًّا متعادل كهربيًّا، ومعظم النيوترونات على كوكب الأرض ترتبط مع البروتونات والإلكترونات في الذرة.

نجم نيوتروني Neutron star: بقايا نجم تتركز فيها مادة توازي حجم مادة الشمس في كرة لا يتجاوز حجمها حجم قمة إيفرست تقريبًا.

نيوكليون Nucleon: اسم عام يشمل البروتونات والنيوترونات؛ الجسيمات الموجودة داخل النواة.

النواة Nucleus: القلب الداخلي للذرة، ويتكون من بروتونات ونيوترونات (تعرف معًا باسم النيوكليونات).

تذبذب Oscillation: الطريقة التي تستطيع بها بعض أنواع الجسيمات التحول من شكل إلى آخر ثم العودة إلى الشكل الأصلي، كما يحدث مثلًا مع جسيمات النيوترينو.

فرسخ نجمي Parsec: ٣٫٢٦ سنة ضوئية.

فوتينو Photino: نظير الفوتون في نظرية السمترية الفائقة.

فوتون Photon: جسيم (بوزون) يرتبط بالكهرومغناطيسية.

بيون Pion: عائلة من ثلاثة بوزونات تسهم في التفاعلات بين البروتونات والنيوترونات.

بوزيترون Positron: نظير الإلكترون في المادة المضادة.

بروتون Proton: جسيم ثقيل نسبيًّا له شحنة موجبة، ومعظم البروتونات على كوكب الأرض ترتبط في ذرات مع النيوترونات والإلكترونات.

كمومي، كمي (صفة) Quantum (adj.): إشارة إلى عالم الجسيمات الدقيقة جدًّا، حيث تطبق قوانين ميكانيكا الكم.

الكمة (اسم) Quantum (noun): أصغر كمية يمكن أن توجد من أي شيء، مثال ذلك أن كمة المجال الكهرومغناطيسي هي الفوتون.

نظرية المجال الكمومي Quantum field theory (= quantum theory of forces): أي نظرية تصف التفاعل بين جسيمات المادة (الفرميونات) من منظور تبادل كمات المجال (البوزونات). نجد في بعض الحالات، وليس في كلها، أن كمات المجال (خاصة في الجاذبية) يمكن أيضًا أن تتفاعل فيما بينها.

الفيزياء الكمومية (= ميكانيكا الكم) Quantum physics: الفيزياء التي تعمل قوانينها على مقاييس صغيرة، هي تقريبًا مقياس الذرة وما هو أصغر.

كوارك Quark: فئة من الجسيمات الأساسية تُصنَع منها كل الباريونات.

كوازار Quasar: القلب النشط للمجرات، والأرجح أنه يستمد طاقته من المادة التي يبتلعها ثقب أسود له كتلة تبلغ مئات ملايين ضعف كتلة الشمس. معظم الكوازارات تسطع سطوعًا يطغى على كل المجرة المحيطة بها، وتكون بالمعنى الحرفي للكلمة أكثر لمعانًا من مائة مليار شمس، وهذا يجعل الكوازارات مرئية على أبعاد شاسعة عبر الكون. اسم الكوازارات يعني أصلًا أشباه النجوم، لأنها تبدو في الصور الفوتوغرافية كأنها نجوم في المناطق البعيدة من الكون.

إزاحة حمراء Redshift: تزايد طول موجة الضوء في طيف جرم يتحرك بعيدًا عن الراصد.

سلكترون Selectron: نظير الإلكترون في نظرية السمترية الفائقة.

المنظومة الشمسية Solar System: الشمس وعائلتها من الكواكب، والمذنبات، وغير ذلك من الحطام الكوني.

(كوارك) غريب Strange: اسم يعطى لإحدى خواص الكوارك، وهو عكس الكوارك الساحر أو الفاتن.

الشريك السوبرسمتري Supersymmetric partner: النظير لكل بوزون وفرميون في الحياة العادية كما تتنبأ به نظرية السمترية الفائقة.

(نظرية) السمترية الفائقة «سوسي» (SUSY) Supersymmetry: نموذج نجد فيه أن كل نوع من الفرميون له نظير من البوزون، والعكس بالعكس. وهو جزء من محاولة الوصول إلى نظرية لكل شيء.

SUSY: Supersymmetry.

التاو، التاوون Tau: نظير للإلكترون أثقل منه وزنًا.

نيوترينو التاو Tau neutino: نظير للنيوترينو أثقل وزنًا ولكنه لا يزال خفيف الوزن جدًّا.

TeV: ألف مليار إلكترون فولت.

نظرية كل شيء (Theory of everything (TOE: أي نظرية (وأميل إلى مصطلح «نموذج») تهدف إلى توحيد وصف الجاذبية وكل قوى الطبيعة الأخرى في حزمة رياضية واحدة.

(كوارك) قمة Top: اسم لخاصية للكواركات، وهو عكس القاع.

(كوارك) علوي Up: اسم إحدى خواص الكواركات، وهي عكس سفلي.

قزم أبيض White Dwarf: نجم في نهاية حياته وقد استقر في كرة صلبة يقترب حجمها من حجم الأرض، وتحوي كتلة توازي كتلة شمسنا تقريبًا.

WIMP: اختصار الجسيمات ضعيفة التفاعل ذات الكتلة الكبيرة، وهذا مصطلح آخر للمادة المظلمة الباردة.

المراجع

وجود العديد من الكتب الخاصة بي في هذه القائمة لا يقصد به أن هذه الكتب هي أحسن ما كتب في الموضوع، وإنما يعني أنها مكملة للكتاب الحالي؛ حيث إنها تقدم معلومات عن الموضوعات التي ذكرت هنا باختصار.

George Abbot, *Flatland*, Shambhalla, London, 1999 (modern paperback reprint of the Victorian classic about life in a two-dimensional world).

Jonathan Allday, *Quarks, Leptons and the Big Bang*, IoP Publishing, Bristol, 1998.

John Barrow and Frank Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, Oxford, 1986.

Marcia Bartusiak, *Einstein's Unfinished Symphony*, Joseph Henry Press, Washington, DC, 2000.

Freeman Dyson, *Origins of Life*, second edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1965.

Brian Greene, *The Elegant Universe*, Jonathan Cape, London, 1999.

———, *The Fabric of the Cosmos*, Allen Lane, London, 2004.

John Gribbin, *In the Beginning*, Viking, London, 1993.

———, *The Birth of Time*, Weidenfeld & Nicolson, London, 1999.

———, *Stardust*, Allen Lane, London, 2000.

———, *Deep Simplicity*, Allen Lane, London, 2004.

John Gribbin and Mary Gribbin, *Annus Mirabilis*, Chamberlain, New York, 2005.

John Gribbin and Martin Rees, *The Stuff of the Universe*, Penguin, London, 1993.

Alan Guth, *The Inflationary Universe*, Cape, London, 1997.

Lawrence Krauss, *The Fifth Essence*, Basic Books, New York, 1989.

Simon Mitton, *Fred Hoyle*, Aurum Press, London, 2005.

National Research Council, *Connecting Quarks with the Cosmos*, National Academies Press, Washington, DC, 2003.

A. I. Oparin, *The Origin of Life on the Earth*, third edition, Oliver & Boyd, Edinburgh, 1957.

Martin Rees, *Just Six Numbers*, Weidenfeld & Nicolson, London, 1999.

Lee Smolin, *The Life of the Cosmos*, Weidenfeld & Nicolson, London, 1997.

Ian Stewart, *Flatterland*, Pan, London, 2003 (modern sequel to George Abbot's classic).

Kip Thorne, *Black Holes and Time Warps*, Norton, New York, 1994.

Chandra Wickramasinghe, Geoffrey Burbidge and Jayant Narlikar, *Fred Hoyle's Universe*, Kluwer, Dordrecht, 2003.

«عميق التأثير ... إطلالة سريعة ... نموذج مثالي للوضوح والإيجاز.»

صحيفة ذي إنديبندنت

كيف نما الكون من كرة نارية متناهية في الصغر إلى حجمه الحالي؟ وما مصدر الحياة على الأرض؟ كيف تنشأ الكواكب؟ وما مآلها؟ ومن أين لنا معرفة ذلك كله على أي حال؟

جون جريبين واحد من أشهر الكتاب البريطانيين في مجال العلم والعلماء الذين أرسوا دعائمه، وقد قرر أن يرصد في هذا الكتاب تاريخ أعظم الموضوعات على الإطلاق، وهو الكون نفسه من بدايته إلى نهايته (وما وراء ذلك).

فتاريخ عالمنا بأكمله يمتد من «الانفجار الكبير» قبل ١٤ مليار عام، وما أعقبه من نشأة النجوم والمجرات وظهور أول أشكال الحياة على سطح الكوكب، إلى أحدث الأفكار عن المادة المظلمة ونظرية كل شيء، وما وراء ذلك من احتمال حدوث «انسحاق كبير» أو «تمزق كبير» في المستقبل.

«أوضح عرض ممكن للأفكار السائدة عن الكون.»

صحيفة ديلي تليجراف

«استنتاجاته بالغة الأهمية والخطورة.»

صحيفة صنداي هيرالد

«واحد من أفضل كتاب بريطانيا العلميين وأكثرهم غزارة في الإنتاج.»

صحيفة صنداي تليجراف



٢٩٦ صفحة

ISBN 978-977-6263-60-4



http://www.kalimatarabia.com

كلمات عربية